

名古屋大学タンデトロンAMS<sup>14</sup>Cシステムの現状と利用 (2020)  
**Status and Applications of a Tandetron AMS System at Nagoya University in 2020**

中村俊夫<sup>1\*</sup>・南 雅代<sup>1</sup>・山根雅子<sup>1</sup>・小田寛貴<sup>1</sup>・池田晃子<sup>1</sup>・小坂由紀子<sup>1</sup>・  
西田真砂美<sup>1</sup>・若杉勇輝<sup>1</sup>・佐藤里名<sup>2</sup>・澤田 陸<sup>2</sup>・酢屋徳啓<sup>3</sup>・北川浩之<sup>1</sup>  
Toshio Nakamura<sup>1\*</sup>, Masayo Minami<sup>1</sup>, Masako Yamane<sup>1</sup>, Hirotaka Oda<sup>1</sup>, Akiko Ikeda<sup>1</sup>, Yukiko Kozaka<sup>1</sup>,  
Masami Nishida<sup>1</sup>, Yuki Wakasugi<sup>1</sup>, Rina Sato<sup>2</sup>, Hitoshi Sawada<sup>2</sup>, Noriyoshi Suya<sup>3</sup>, Hiroyuki Kitagawa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>名古屋大学宇宙地球環境研究所・<sup>2</sup>名古屋大学大学院環境学研究科・<sup>3</sup>SVE研究所

<sup>1</sup> Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

<sup>2</sup> Graduate School for Environmental Studies, Nagoya University

<sup>3</sup> SVE Research Institute

\*Corresponding author. E-mail: nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp

**Abstract**

A Model 4130-AMS by High Voltage Engineering Europe B.V., dedicated to <sup>14</sup>C measurements was delivered to Nagoya University in 1996/97. Acceptance tests of its performance were completed in 1999, and a routine operation started in mid-2000. The number of targets measured was 330, 1430, 2077, 1003, 1,979, 1679, 1772, 1115, 1339, 866, 1300, 1701, 1449, 1634, 1351, 1741, 1156, 466, 900, 1345, 653 and 1123 in each year from 1999 to 2020, respectively, and total number of targets measured by the end of 2020 is 28,408.

The problems in 2020 are; (1) instability of C<sup>-</sup> beam intensity was a big problem for high statistical <sup>14</sup>C measurements. Intensities of C<sup>-</sup> beam gradually decreased to 1/5 from the begging of <sup>14</sup>C measurements in about 15 hours. We could not increase the beam intensity any more, even increasing Cs sputtering ions by heating up the Cs reservoir temperature. We tried to shut the ion source down and power on again, but not successful. However, the ion source was opened and cleaned to successfully recover the ion beam intensity. We applied this method for routine <sup>14</sup>C measurements, although it wasted a lot of time; (2) the power supply for the recombinator magnet was out of order. The control of DC current for the magnet did not work well. We replaced a power transistor on the circuit board to repair it; (3) a plunger unit to grasp the target for loading and unloading it to the sputtering position was out of order. The four fingers of the plunger were partly broken and could not grasp targets firmly to move them from carousel to the sputtering position and back. We replaced it to a new one; (4) because of instability of DC voltage of about 90 [V] supplied for a Y- steerer in the ion source, with the fluctuation of about  $\pm 5$  [V], C<sup>-</sup> beam suffered instability in the direction of the beam. A part of the C<sup>-</sup> beam even hits the wall of the beam line. The power supply for the Y-steerer was repaired; (5) a step of initialization to start up the target handling in the ion source could not work well. A target movement control by computer was out of order. We replaced a X-motion motor that could be broken, and changed 6 units of light-guide cable for communication of signals to control the end parts of the ion source unit. In particular, the replacement of light-guide cables was effective for the successful handling of the targets.

**Keywords:** *accelerator mass spectrometry; radiocarbon; ion source handling; gradual decrease of carbon beam from ion source; recombinator magnet power supply; Y-steerer in the ion source; X motion motor; light-guide cable*

## 1. はじめに

名古屋大学のタンデム加速器質量分析装置は、1996/97年に設置されたHigh Voltage Engineering Europe (HVEE)社製Tandetron (Model 4130-AMS)で、イオン入射部にrecombinator systemを有し、放射性炭素測定専用のシステムである(Nakamura et al., 2000)。1999年1月に $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定の性能検収を終了し、2000年度から学内共同利用を開始したもので、使用開始後20年を経過し、老朽化が目立つ。しかし、 $^{14}\text{C}$ 測定の精度はそのまま維持されている。AMS装置の状況は、2015年に入って加速器高電圧が不安定になり、 $^{14}\text{C}$ 測定実験が滞りがちになり、その後も故障が発生する頻度が高くなっていた。昨年度の報告書(中村ほか, 2020)に示したように、2019年には、些細な故障が断続的に続き、年間の測定個数は653個に減少した。しかし、2020年に入ってから、主としてイオン源の不具合があるものの、 $^{14}\text{C}$ 測定は順調に進んでいる。ここでは、2020年1月から2021年3月にかけての装置の運転概況を報告する。

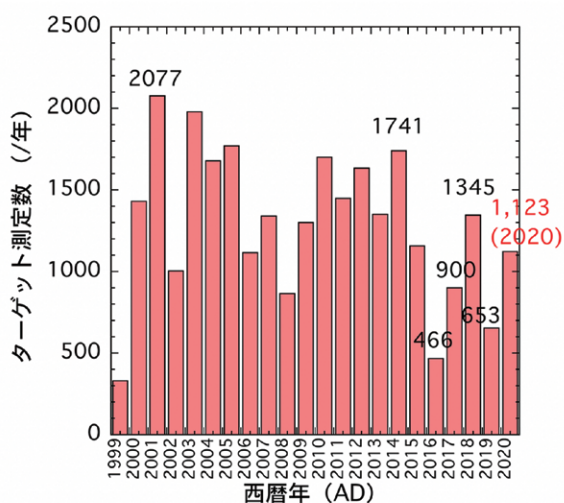


図1 年ごとのターゲット測定数  
(1999～2020)

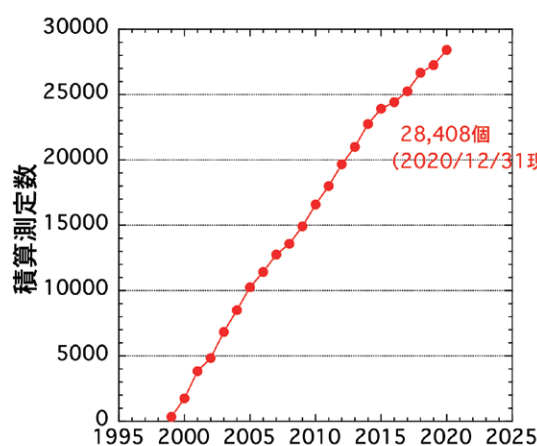


図2 測定したターゲットの積算数  
(2020年12月末までで28,408個)

## 2. 2019/2020年の装置の運転状況

1999年から始まった $^{14}\text{C}$ 測定につき、測定数などの経年変化を図1および図2に示す。これまでに報告してきたように(業績報告書, 1988～2016; 年代測定研究, 2017～2020)、2015年から2018年前半にかけては、大きなトラブルが発生し、測定数が限られてきた。しかし、2018年後半から2019年にかけては、もちろん装置のトラブルはあったものの、比較的順調に稼働したといえる。ところが、2019年3～8月、11～12月には、些細な故障が断続的に続き、測定が進まなかった。その後、2020年4月から現在(2021年3月)まで、イオン源からの炭素負イオン出力の不安定に悩まされてきた。

2019年の不具合の状況は、名古屋大学年代測定研究vol.4(2020)に報告した。ここでは、2020年1月から2021年3月までの間に発生したタンデトロン分析計の主要な不具合を以下に列挙し、その概要を次章にまとめる。

- (1) (2020年4月18-22日) 炭素イオン出力の経時変動が顕著になり、測定の始めは、十分な出力があるものの、数時間を経ると、炭素イオン出力が低下する。
- (2) (2020年5月19日) リコンビネーター電磁石電源の故障。
- (3) (2020年11月11-12日) ターゲットを掴んでイオン源の測定位置に移動させ、設置する機構(プランジャー)の取替。(1回目)
- (4) (2020年12月04日) 上下方向の $\text{C}^-$ ビーム偏向電極の電源の修理。
- (5) (2021年2月26日) ターゲットを掴んでイオン源の測定位置に移動させ、設置する機構(プランジャー)の取替。(2回目)

(6) (2021年3月8-12日) イオン源初期化におけるターゲットのX-Y位置の初期化不良、特に、モーターの動作不良とターゲットのZ軸方向(アームの進行・後退方向)の制御不良。

これらの不具合により、2020年には、タンデトロンAMSシステムを十分に稼働させることができなかった。表1に、名古屋大学タンデトロン加速器質量分析装置について、2020年1月から2021年3月までの間のターゲット測定数と運転中に発生したさまざまな不具合の状況を示す。

表1 2020-2021年における月別のターゲット測定数と不具合の状況(2020/01/01~2021/03/17)

月	測定番号 (NUTA2- 27913~	測定数	batch数	発生した不具合、及びコメント
2020	~27299	107	15	1/11 (土) -12 (日) イオン源の分解掃除。新品アイオナイザーで組立。 Cs 2g を充填。 1/21 (火) $^{14}\text{C}$ 測定開始。
1	~27497	198	24	特になし。 $^{14}\text{C}$ 測定は順調に進んだ。
2	~27710	213	26	3/1 (日) Cs ビームが他ゲットの表面をスパッタする位置を制御する panto-position の位置の調整を開始。 3/11 (水) 「target chamber」部が台座の正常な位置にない。設置位置が 狂ってきている。点検を要することを確認した。 3/21 (土) 高電圧がスパーク無しに、ダウンし、炭素ビームの加速無し に、測定プロセスが進む現象が複数回見られる。原因は不明。
3	~27866	156	19	4/17 (金) 測定調整の際には炭素ビーム強度は充分強いが、数時間経つ とビーム強度が次第に減衰する。初めての現象で、原因不明。Cs タン クの加熱温度を上げて、同じような現象が続いている。 4/27 (月) マニュアルでターゲット交換中に、交換の失敗があった。 $^{14}\text{C}$ Batch 測定の際にも発生し、計 5 回起きている。Batch がスムーズに進ま ない。検討する必要がある。
4	~27898	32	3	5/5 (火) 前月から見られるように、ビーム強度が次第に減衰すること から、この対策の一つとして Cs タンクの加熱温度を上げて測定したら、 イオン源の汚れが目立ち、ターゲット電圧電源が汚れて短絡する事象が 発生した。 5/19 (火) Recombinator magnet 故障。 5/20 (水) target chamber の圧縮空気制御装置を取り外す。
5	~27959	61	10	6/5 (金) 菊池さん、recombinator magnet の点検修理。 6/8 (月) ~6/9 (火) イオン源の分解掃除。アイオナイザーは新品を使用 する。Cs 2[g]を充填。 6/21 (日) B200621a1 スタート。ビームが弱い。測定の進行に伴って炭 素ビームの減衰が起きる。
6	~28048	89	11	7/8 (水) B200708a1 スタート。 $^{12}\text{C}^{3+}$ ion beam 強度が、時間と共に減衰。 7/31 (金) 高電圧がダウン。小さな高電圧スパークで Q-snout-TMP の排 気がオフになって、加速管の真空が悪くなり、高電圧がダウンした。
7	~28129	81	10	8/5 (水) -8/6 (木) 小倉さん、酢屋さんの訪問あり。炭素ビームの減衰 が起きる原因を検討・討論。
8	~28220	91	10	9/9 (水) -9/10 (木) 酢屋さん、小島さん、の訪問あり。イオン源冷却 系のシリコンオイル容器のパッキンを増す締め。合わせて、シリコンオ イルによるイオン源冷却の配管ラインを点検したが異常なし。
9	~28315	95	10	10/21 (水) -10/23 (木) 酢屋さん、小島さんの訪問。シリコンオイル の送水ポンプのパッキンを交換。
10	~28315	0	0	11/11 (水) -11/12 (木) plunger (ターゲットのグリップ装置) の交換。 plunger は、新品のネジが合わないため、使い古しを使用。Arm (rod)も 交換した。 11/15 (日) 全学の計画停電。 11/16 (月) RP のオイル交換。 11/19 (木) Source Y-steerer 電圧の異常を発見。この電圧が不安定なた めに、C-ビームが縦方向にふらついていることを発見した(ファラデー カップ 1 番 (FC1) の読み)。設定電圧が-90.0 [V]のとき、 $\pm 4 \sim \pm 5$ [V]の ふらつきがあった。このふらつきにより、FC1 をビームラインから外し て、上側に収納した際にも、上側に振れた炭素ビームの末端部を FC1 が検出していた。 11/30 (月) 電源を外して、菊池さんに点検・修理を依頼。
11				



12	~28315	0	0	12/04 (金) Source Y-steerer 電源の修理完了。この修理により、イオン源から、 $^{14}\text{C}$ 検出器までの全てのファラディカップで、炭素ビームのふらつきはなくなった。 12/8 (火) 三洋電機の UPS 電源の設置完了。動作確認は OK。 12/11 (金) HV conditioning の途中で高電圧がスパークして、大音響が発生。 12/21 (月) HV conditioning の途中で高電圧がスパーク。これは無人の中で発生。
	合計測定数	1123		
2021 1	~28384	69	12	1/05 (火)、1/06 (水)、1/09 (土) と加速器高電圧が落ちて、不安定な状態であるため、1/10 (日) ~1/14 (木) の5日間、SF6の脱水を実施。 1/14 (木) ~1/19 (火) 高電圧コンディショニング。 1/20 (水) B210120a1 を開始して、テスト測定を開始。 1/21 (木) $^{14}\text{C}$ 測定が途中で自動的に停止した。測定ターゲットの交換のトラブルによる停止と判明。 1/24 (日) ~1/26 (火) Wheel210122 測定完了。 1/29 (金) ~2/2 (火) Wheel210127 測定完了。
2	~28475	91	10	2/06 (土) ~2/10 (水) Wheel210204 の測定完了。 2/14 (日) ~2/18 (木) Wheel210212 の測定。 2/18 (木) Wheel210212 の測定中にイオン源のトラブルで測定が停止。イオン源の測定ターゲットの制御において、トラブルが多発。X-Y table homing が出来なくなった。 2/24 (水) ターゲットを掴む Plunger のツメが外側に折れ曲がって、使えなくなった。 2/26 (金) 酢屋徳啓さんに加わって頂き、Plunger の交換を実施。
3	~28475	0	0	3/1 (日) イオン源の Initialization の不良。X-Y table homing の途中で、停止して動かないことがある。X-Motor が不良で、作動不良と判断。X-Motor の交換を決意 3/8 (月) ~3/12 (金) 再度、酢屋徳啓さんに加わって頂き、X-motor の交換、イオン源の調整を行った。最終的には、X-motor の交換、光ケーブルを6本交換した結果、イオン源の initialization ができるようになった。 3/12 (金) ~3/17 (水) 今回は3/8 (月) から3/12 (金) まで、イオン源アイオナイザー部を、毎日ほぼ12時間程度は大気にさらしていたので、金属セシウムの劣化が心配である。今回の修理 (3/8-3/12) を行う以前の測定では、74~76°C (Wheel 210204, 210212) の設定で $^{14}\text{C}$ 測定が出来たが、3/17 (水) の出力テストでは、FC1 が 25~40 [uA] 出力の時の Cs Res Temp の設定温度は、95°C と異常に高い温度が必要であった。

### 3. 主要な保守作業

#### 3.1 炭素イオン出力の経時変動とその対処

炭素イオン出力の経時変動が顕著になり、測定の始めは、十分な出力があるものの、数時間を経ると、炭素イオン出力が低下する。セシウム溜の温度を上昇させても、あまり効果がなく、炭素イオン出力は回復しない。その一例を図3に示す。

図3には、Wheel200417の測定中の炭素ビーム ( $^{12}\text{C}^{3+}$ ) の強度変動を示した。通常の測定では、約45個のターゲットをWheelに充填し、1個を30分、Wheel全体をほぼ1日かけて測定し、これを5回、5日間かける。

図3に示されるように、初日の測定において  $^{12}\text{C}^{3+}$  ビームの強度は200 [nA] から40 [nA] へと約1/5にまで減少する。この後は、セシウムスパッターイオン源のセシウム溜の加熱温度を上昇させても、 $^{12}\text{C}^{3+}$  ビームの強度は回復し

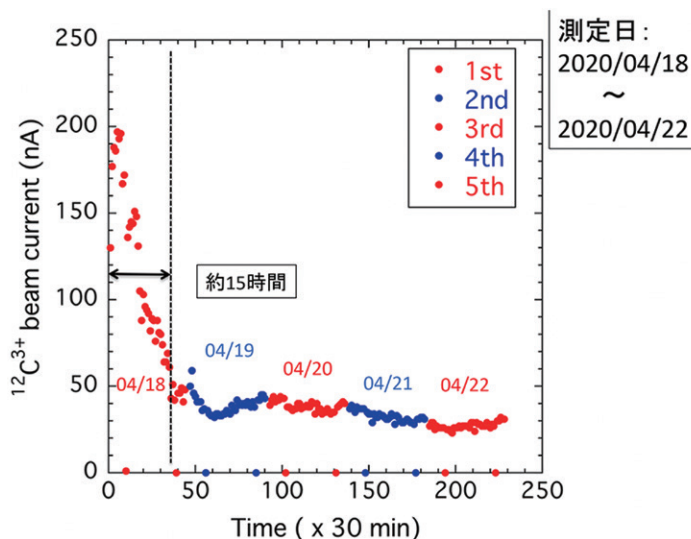


図3 5日間繰り返す測定の初日において認められた  $^{12}\text{C}^{3+}$  ビーム強度の大きな減衰

ない。表2に、測定の日日に装置を調整したときと、5日間の測定を終了したときの、炭素イオンビーム強度を比較して示す。ビーム強度が弱いと、 $^{14}\text{C}$ 計数を増やすことが出来ず、最終的には $^{14}\text{C}$ 測定 of 統計誤差が大きくなる。Wheel200417の測定結果では、NBS-new標準体の測定誤差は年代値の誤差にすると  $\pm 40$ 年程度であり、残念ながら最新技術の現状からすると高精度測定とはいえない。

表2 炭素イオン強度の、 $^{14}\text{C}$ 測定開始時と測定終了時の比較  
(セシウム溜の加熱温度を77℃に設定のとき)

Name of Faraday cup	ビーム強度の測定位置	$^{14}\text{C}$ 測定を始めたときの炭素ビーム強度 (A)	$^{14}\text{C}$ 測定を終了したときの炭素ビーム強度 (B)
FC1	イオン源の出口	33.4 [ $\mu\text{A}$ ]	6.64 [ $\mu\text{A}$ ] (B/A=0.20)
FC2	リコンビネーター部	21.5 [ $\mu\text{A}$ ]	4.22 [ $\mu\text{A}$ ] (B/A=0.20)
FC4	タンデム加速器の出口	1228 [nA]	253 [ $\mu\text{A}$ ] (B/A=0.21)
$^{13}\text{C}^{3+}$ cup	分析電磁石の直後	0.25250 [ $\mu\text{A}$ ]	0.04322 [ $\mu\text{A}$ ] (B/A=0.17)
$^{12}\text{C}^{3+}$ cup	分析電磁石の直後	0.23790 [ $\mu\text{A}$ ]	0.04106 [ $\mu\text{A}$ ] (B/A=0.17)

このように、炭素ビームが測定時間の経過と共に約1/5に減衰する傾向(約半日間で、1サイクル24時間をかけることから、1サイクルの測定の中で減衰することになる)は、4月以降にしばしば発生した。この現象は、常に発生するわけではなく、正常に測定が進むこともあった。

この現象の対処の試みとして、 $^{12}\text{C}^{3+}$ ビーム強度の減衰が発生したとき、一端、イオン源を停止して、イオン源の電源を完全にオフにしたあとに、イオン源の再起動を試みた。残念ながら、この際には、初めから、炭素ビーム出力が低いままで回復はなく、測定を開始することは出来なかった。

第2の試みとして、1回目のBatch-runでビーム強度が減衰したら、いったんイオン源の電源と真空を完全に落として、イオン源の掃除を行い、再度立ち上げることを行ってみた。このときは、そのあとの $^{14}\text{C}$ 測定ではビーム強度の減少はなしに、5回のBatch測定を完了することが出来た。このように改善される理由はこのときには不明であったが、手間がかかるが、とにかく、通常の精度で $^{14}\text{C}$ 測定を継続することが出来た。Wheel200722とWheel200811の測定において、上記の状況を図4に示す。Wheel200722

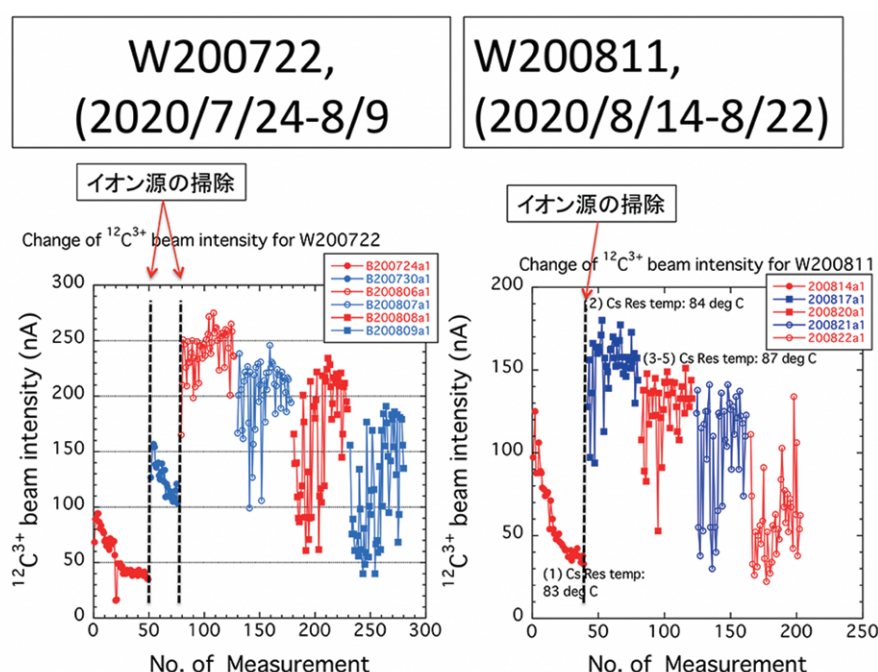


図4  $^{14}\text{C}$ 測定 of 途中で、イオン源を完全停止して、掃除を行った場合の測定例



の測定では、7/24 (金) のB200724a1測定で、 $^{12}\text{C}^{3+}$ ビーム強度が減衰したので、今回は、1回のこのBatch-runで測定を中断して、イオン源をパワーオフにして、再度立ち上げることにした。7/25 (土) にイオン源をパワーオフ。但し、イオン源の掃除はしない。7/26 (日) に再度、イオン源の立ち上げテストを行った。イオン源の炭素負イオン出力は、回復しない。Cs Res. Temp.を初日の83℃から86℃まで上げても、負イオン出力 (FC1) は5.71 [ $\mu\text{A}$ ] が最大で、これ以上は、イオン源のCs Res. Temp.を高くしても、増加しない。7/27 (月) に再度、イオン源をパワーオフにして、イオン源の再立ち上げテストを行ったが、Cs Res. Temp. 90℃で、負イオン出力 (FC1) : 5.32, 6.03 [ $\mu\text{A}$ ] が最大であった。7/28 (火) イオン源を一端パワーオフにして、再度立ち上げると、Cs Res. Temp. 87℃で、負イオン出力 (FC1) : 6.03 [ $\mu\text{A}$ ] が最大であった。最終的に、Cs Res. Temp. を94℃ (読み92℃) に高くしたが、負イオン出力 (FC1) : 8.5 [ $\mu\text{A}$ ] が最大であった (イオン源電源のターゲット電流が483.5 [ $\mu\text{A}$ ] のとき)。

そこで、7/29 (水) に、イオン源の掃除・洗浄を行って、7/30 (木) イオン源の再立ち上げをおこなった。この場合には、Cs Res. Temp.が87℃のとき、負イオン出力 (FC1) : 23.00 [ $\mu\text{A}$ ] に回復した。こうした経過を経て、Wheel200722は、図4の左側に示されるように $^{14}\text{C}$ 測定が進行した。

このような事で、二度手間をふむことになるが、必要に応じて、1サイクルの測定で複数回のイオン源の掃除を行い、 $^{14}\text{C}$ 年代測定の進行を最優先させている。

### 3.2 Y-steerer電源の保守

近年、炭素ビームの変動が目立って大きくなり、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ の測定の安定性が問題であった。この問題については、炭素ビームの最上流部にあるイオン源のY軸方向のビーム偏向を制御するY-steerer電源の出力が周期的な変動をしている事が原因となっていることが判明した。Source Y-steerer 電圧の変動を図5に示す。この電圧が不安定なために、Cビームが縦方向に大きくふらついていることを発見した(ファラデーカップ1番(FC1) の読み)。設定電圧が -90.0 [V]のとき、 $\pm 4 \sim \pm 5$  [V]のふらつきがあった。このふらつきにより、FC1をビームラインから外して、上側に収納した場合でも、Y-steerer電圧の変動により上側に振れた炭素ビームの末端をFC1が検出していることが確認された。

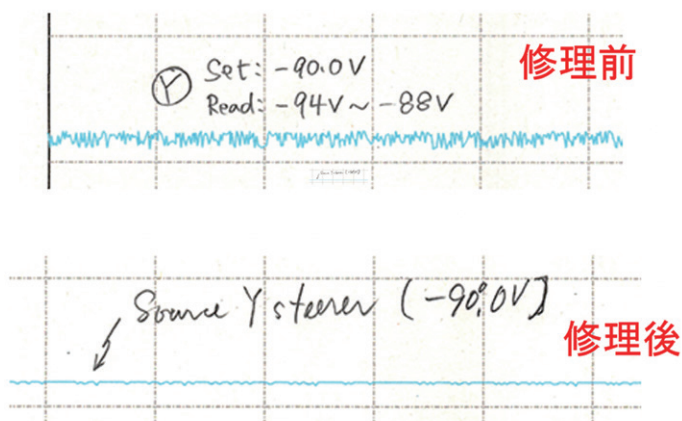


図5 イオン源部、Y-steerer電源の出力電圧 変動の修理前後における比較

過去のデータを調べると、Y-steererの電源は、10年前から小さな変動が見られており、近年その変動が次第に大きくなってきた。しかし、このAMS 装置では、リコンビネーターを用いて同時測定を行っているため、この電源に起因するビーム強度変動は $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ で均等に影響するため、この変動の効果がキャンセルして、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定には影響をほとんど及ぼさなかった。このY-steerer電源の修理を行うまでに沢山の試料を測定したが、得られた $^{14}\text{C}$ 年代は、非常に調和的な値であったことから、利用者は安心して頂きたい。初めに、リコンビネーターの悪口を書いたが、このように有用であった面も挙げられる。

### 3.3 イオン源の初期化とイオン出力

2021年のWheel210212の測定で、Batch210216とBatch210217の測定が終了したあと、イオン源の初期化を行う直前と直後でのビーム出力を比較して表3に示す。

表3 2012年の2/17 (水) (Batch210216の終了後)、2/18 (木) (Batch210217の終了後) のイオン源初期化の直前と直後のビーム強度の変化

Date	Operation	FC1[ $\mu$ A]	FC2[ $\mu$ A]	FC4 [ $\mu$ A]	$^{13}\text{C}^{3+}$	$^{12}\text{C}^{3+}$
2/17	initialization 前	12.67	8.13	693	0.10732	0.10440
	initialization 後	24.98	16.92	1457	0.23875	0.22899
2/18	initialization 前	9.96	6.32	515	0.08190	0.07887
	initialization 後	26.84	18.05	1492	0.25008	0.23881

このように、イオン源を初期化すると、減衰していた炭素イオンビーム強度が減衰から立ち直って大きく増加する理由を考える。50個程度の試料ターゲットの、約1日を要する連続測定では、ターゲットの交換を行う度に、ターゲットのZ方向（ターゲットの運動の軸の方向）の移動操作を行うが、このとき、Z方向のターゲットの位置が次第に狂ってくるのではないかと想像される。例えば、ターゲットがアイオナイザーから遠ざかる位置に挿入されると、ジオメトリの理由から、炭素ビーム出力が変動して、弱くなる方向にずれてくる可能性が考えられる。

すなわち、 $^{14}\text{C}$ 測定を行っている間には、数十個のターゲットをcarrouselから測定位置に移動させる。このときのZ方向の再現性が悪く、ターゲットが元の位置に戻らないため、このような炭素ビーム強度の変化が起こるのではないかと。一方、X-Y方向の移動の再現性は、目視観測が出来ており、位置のずれは観測されていない。丸一日の測定のと、イオン源の初期化を行うと、全ての方向でのずれがリセットされて、新たに測定されるターゲットの位置が元の位置に戻ると考えられる。

上記の3.1節において説明したように、測定中の炭素イオンビームが測定の途中で次第に減衰する現象は、このZ方向のターゲット位置の再現性が悪くなっていることが原因と思われる。実際、イオン源の電源をオフにするだけの試験の場合は、イオン源の初期化は行っていない。一方、イオン源の洗浄・掃除では、作業後にイオン源の初期化を行う必要がある。このイオン源の初期化の操作が、イオン源の洗浄・掃除のあとに、正常な $^{14}\text{C}$ 測定ができるようになったことと関係すると考えている。

### 3.4 ターゲットを掴むプランジャーの交換

2021年の2/24 (水) に、ここ数日間発生していたイオン源の初期化におけるトラブル、特に、初段階の“X-Y tableの初期化”をテストするうちに、イオン源の初期化が途中で停止するようになってきた。プログラムの途中の警告をパスして、先に進めると、イオン源の初期化の最後の段階で、“empty target position”を捜す操作が止まらなくなった。

そこで、イオン源をオープンすると、ターゲットを掴むプランジャーの4本の爪の1本が、外側に向けて、花が咲くように曲がり、プランジャーの前進が小穴にブロックされ、小穴を通過して先に進むことができなくなっていた。このステンレス製のプランジャーの破損を、ペンチを用いて機械的に元通りにしようと努力したが、元には戻らない。ツメが外側に膨れた状態になって、ターゲットを掴むことが出来ない。

そこで、2012年の2/26日(金) に、プランジャーの取換え作業を、次の手順でおこなった。

- (1) 破損したプランジャーの取り外し。
- (2) ストックされていた2個のプランジャーでは、いずれも、どうしてもネジが合わず、本体と接続できない。  
そこで、別のイオン源からプランジャーを取り外して使うこととした。
- (3) 別のイオン源から取ってきたプランジャーはネジがスムーズに入り、本体に接続して使用できた。
- (4) イオン源を元通りに組立て、パソコンによるイオン源の初期化が無事完了した。しかし、炭素イオン出力のために、load target #1の操作をおこなうと、loadされたアームが飛び出したまま、初期の位置には戻らない。



- (5) ともかく、のこり時間の観点から、この日はイオン源の全体を組み立てて、真空引きを開始し、この問題は、後日対処することとした。

### 3.5 X-motorの交換と光ケーブルの交換

イオン源の初期化におけるトラブル、特に、初期化の初段ステップの”X-Y tableの初期化“をテストするうちに、イオン源の初期化が途中で停止するようになってきた。その原因として、X-Y tableの駆動モーターのうち、X-motorの不良が疑われたため、X-motorの取替を行うこととした。3/4 (木)に、むつAMSにおいて、モーター取替の経験を持つ木下尚喜さんへ「X-Y tableの駆動モーターの取替」について相談した。むつAMSで取り換えたときの経験から作成された「モーター取替マニュアル」を提供して頂いた。

3/8 (月)～3/12 (金)に、SVE社の酢屋徳啓さんに参加して頂き、X-motorの交換、イオン源の調整を行った。最終的には、X-motorの交換、光ケーブルを6本につき交換した結果、イオン源の初期化、測定ターゲットのloading (特定の一つのターゲットを、複数のターゲットがセットしてあるカラーセルから選んで、イオン源の測定位置に移動させる操作)と unloading (測定したあとのターゲットをカラーセルの元の位置へ戻す操作) が正常に実行できるようになった。

今回の修理では、光ケーブルの交換が非常に有効な処置であった。装置の導入後、25年近くが経過しており、光ケーブルの劣化が大きな問題となる。160本を超える光ケーブルが使用されており、これらの保守、特に交換を検討しておく必要がある。

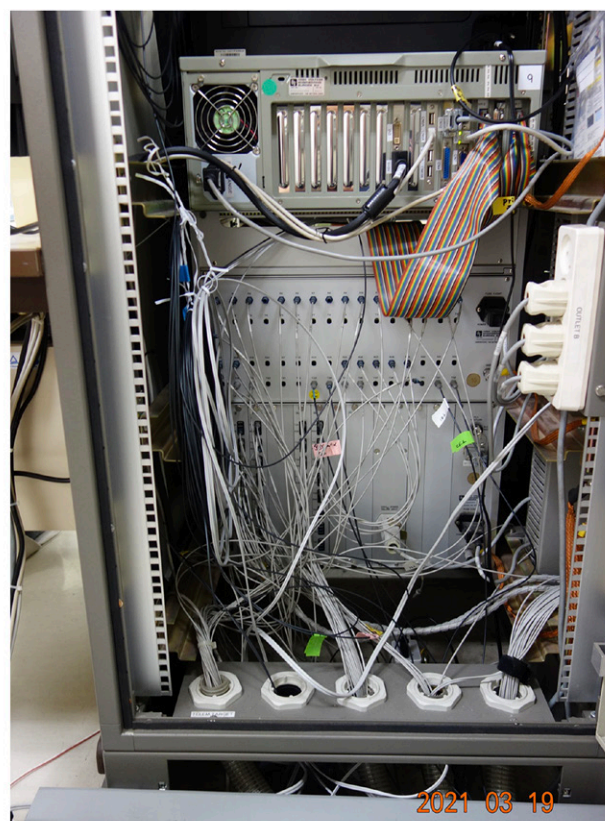


図6 パソコンから加速器部分を制御するための信号を伝達する光ケーブル。  
左側：装置のおもて面、右側：装置の裏面



### 3.6 修理後のイオン源の立ち上げの問題

2021年の3/13 (土) に、target #1をloadingして、イオン源の立ち上げを行った。3/8 (月) から3/12 (金) まで、毎日ほぼ12時間程度は、イオン源を大気にさらしていたので、金属セシウムの劣化が心配である。取りあえずは、通常のやり方でイオン源を立ち上げてみることにした。3/15 (月) のイオン源の立ち上げでは、さすがに、炭素ビームの出が良くない。この日は、最終的に22:30の時点で、FC1:5.37 [ $\mu$ A]の出力の上昇であった。(target #2, actual position X=1.00, Y=1.00、Cs Re temp. の設定が95℃ (読み: 125-126℃) のとき)。その後も、イオン源の立ち上げを継続し、3/16 (火) のイオン源の立ち上げでは、時刻19:15, FC1:  $\sim$ 28 [ $\mu$ A] at Cs Re Temp. = 96℃ に設定 (読み: 125-126℃)、時刻20:20, FC1:  $\sim$ 38 [ $\mu$ A] at Cs Re Temp. = 96℃ に設定 (読み: 125-126℃)、であった。

3/17(水) のイオン源の立ち上げでは、Cs Re temp. を96℃にセットしたとき、炭素の負イオン出力は40 [ $\mu$ A]を超えることもあり、セシウムの加熱温度として通常使用する温度である75-77℃に比べてすこぶる高くする必要があるが、 $^{14}\text{C}$ 測定ができる炭素イオン出力に達している。そこで、カーセルにセットしてあるPosition #12  $\sim$  #35のターゲットについて、順次、出力テスト(仮Batch test)を行った。その結果は、

FC1: 30  $\sim$  40 [ $\mu$ A]、B210317a1、for Position #12 $\sim$ #22、Cs Res Temp. 95℃、よみ126℃

FC1: 25  $\sim$  35 [ $\mu$ A]、B210317a1つづき、for Position #20 $\sim$ #30、Cs Res Temp. 95℃、よみ126℃

FC1:  $\sim$ 30 [ $\mu$ A]、B210317a1つづき、for Position #12 $\sim$ #22、Cs Res Temp. 95℃、よみ126℃であった。

このように、FC1出力(炭素負イオンビーム)を監視した仮のBatchテスト: B210317a1 (Position #12 $\sim$ #35, total 24 targets) は、ほぼ順調にテスト測定を進めた。もちろん、このときのCs Res Temp.の設定温度は、95℃と通常に比べて高い。次は、通常の $^{14}\text{C}$ 測定を実施する計画である。

### 4. おわりに

タンデトロン加速器質量分析装置は、導入後20年以上を経過して、本報告にもあるように、さまざまな故障、トラブルが目立ってきている。しかし、名古屋大学タンデトロンAMSシステムによる $^{14}\text{C}$ 年代測定では、約5千年前よりも若い試料について、ほぼ定常的に $\pm 20 \sim \pm 30$ 年の誤差(1標準偏差)で年代測定が可能である(Nakamura et al., 2004; 2007)ことから、一方では、ますますもって文化財科学や考古学関連のさまざまな資料の高精度年代測定への利用が期待されている。試料調製を含めたAMS  $^{14}\text{C}$ 年代測定のバックグラウンドは、45,000–50,000 BPに相当しており、一般の試料では、4万年前の前半程度までは測定が可能である。また、本システムは、年代測定に限らず、環境研究において、炭素循環の解明などにも幅広く利用されている。

これらの応用研究の一部は、名古屋大学年代測定研究(2017; 2019; 2020)、名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988–2016)に纏められ、ウェブによる論文の閲覧やダウンロードができるようになっている。是非、参照して頂きたい。

### 謝辞

タンデトロン加速器質量分析計の改造や保守、さらに運転のための消耗品類の開発などにおいて、松下幸司氏を始めとする名古屋大学全学技術支援センターの教育・研究技術支援室(旧理学部装置開発室)の皆様には大変お世話になっています。また、日本原子力研究開発機構むつAMS事務所の木下尚喜・甲昭二・津幡圭介の方々には、名古屋大学と同型のAMSシステムを使用していることから、さまざまな情報を互いに交換するなどして便宜を図って頂いています。さらに、近年に発生したさまざまな電気回路の故障の際には、東京都内のK企画の菊池幸彦氏、(株)極東貿易の小倉一郎・小島慧吾の両氏に多大なご支援を頂いています。ここに、記して関係者の皆様に深く感謝致します。

## 引用文献

- 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988–2016) 名古屋大学年代測定総合センター, I–XXVII.  
名古屋大学年代測定研究 (2017–2020) 名古屋大学宇宙地球環境研究所, vols. 1(196p), 2(117p), 3(116p), 4(86p).  
Nakamura, T., E. Niu, H. Oda, A. Ikeda, M. Minami, H. Takahashi, M. Adachi, L. Pals, A. Gott dang, and N. Suya (2000) The HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.*, **B172**, 52–57.  
Nakamura, T., et al (2004) High precision  $^{14}\text{C}$  measurement with the HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.* **B223-224**, 124–129.  
Nakamura, T., et al (2007) High precision  $^{14}\text{C}$  measurements and wiggle-match dating of tree rings at Nagoya University, *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res.*, **B259**, 408–413.

## 日本語要旨

名古屋大学宇宙地球環境研究所では、1997年3月に完納されたHigh Voltage Engineering (HVE)社製 Tandetron (Model 4130-AMS)が放射性炭素 ( $^{14}\text{C}$ ) 測定専用装置として運用されている。最大の特徴は、イオン入射部にリコンビネーターを備えて、炭素の3種の同位体が同時に測定でき、導入された当時は $^{14}\text{C}$ 測定において高性能を誇っていた。しかし、今になると $^{14}\text{C}$ しか測定できない事が利用拡張の妨げになっている面もある。

2019年にはわずか653個しか測定できなかった。大きな故障はなかったものの、細かい不具合が重なり、試料の測定が進まなかったことによる。2020年は1123個のターゲットを測定した。しかしこの間も、測定精度に関わる、イオン源の炭素ビーム出力に大きな問題が発生した。炭素ビーム出力の経時変動が顕著になり、測定の始めは、十分な炭素ビーム出力があるものの、数時間を経ると、炭素ビーム出力が低下する。対策として、セシウム溜の温度を上昇させても、あまり効果がなく、炭素ビーム出力は回復しない。この事象が発生して以来、イオン源のターゲット電圧電源、引出電圧電源、シリコン冷却系のパイプの詰まりの有無、セシウムイオナイザー電源、セシウム温度制御装置など、各種の付属装置などの交換を試みてきた。2011年3月上旬にイオン源のX-motorの取替を行い、さらに、光ケーブルの交換を行ったことから、これまでに問題があった症状が出なくなっている。現在のところ、問題は、まだ解決していないが、今後、注意深くテスト・ランを進める必要がある。

この間に、最近になって炭素ビームの変動が大きくなり、 $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ の測定の安定性が問題であった。この問題については、炭素ビームの最上流部にあるイオン源のY軸方向のビーム偏向を制御するY-steerer電源の出力が周期的な変動をしている事が原因となっていることが判明した。過去のデータを調べると、10年前にも小さな変動があり、近年その変動が次第に大きくなってきた。しかし、このAMS 装置では、リコンビネーターを用いて同時測定を行っているため、この電源に起因するビーム強度変動は $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ で均等に影響するため、この変動の効果がキャンセルして、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比の測定には影響をほとんど及ぼさなかった。このY-steerer電源の修理を行うまでに沢山の試料を測定したが、得られた $^{14}\text{C}$ 年代は、非常に調和的な値であったことから、利用者は安心して頂きたい。初めに、リコンビネーターの悪口を書いたが、有用であった面も挙げられる。