

名古屋大学タンデトロン2号機の現状と利用

中村俊夫*、南 雅代、小田寛貴、池田晃子、渡邊隆広、太田友子、吉岡茂雄、西田真砂美
名古屋大学年代測定総合研究センター 加速器年代測定グループ

(* 連絡先 : e-mail:nakamura@nendai.Nagoya-u.ac.jp; Phone:052-789-3082)

1. はじめに

名古屋大学年代測定総合研究センターに、平成9年3月に設置されたHigh Voltage Engineering Europe (HVEE)社製 Tandetron (Model4130-AMS)は、放射性炭素測定専用のシステムである。タンデトロン2号機と呼称しているこのシステムは、マルチカソードのCsスパッタ負イオン源 (Model 864B)、負イオンの進行方向を180度曲げる間に、質量数12、13そして14の負イオンを選別し、質量数12のイオン強度だけを約100分の一まで減衰させ、さらに質量数で分かれたイオン軌道を再度結合して加速器に導入するリコンビネーターシステム、3MVベースのタンデム加速器、110度および90度曲げ角度の質量分析電磁石2台、33度曲げ角度の静電デフレクタ、およびイソブタンガスを用いる電離箱検出器からなり、試料中の ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{12}C の同位体比を高精度で測定できる (Nakamura et al, 2004)。1999年1月に $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比測定による性能などの検収を終了したが、直後に初期故障などのトラブルが続出した。2000年度から学内共同利用を開始した。その後、2002年に重大な故障をおこした (丹生ほか、2002, 2004 ; 中村ほか、2005)。この間、タンデトロン2号機については、使用状況、故障状況について、毎年このシンポジウムで報告を行ってきた。ここでは、2005年1月から2005年12月にかけての1年間について報告する。この間の大きな出来事は、ついに1万個のグラフィットターゲットの測定を達成したこと、及び加速器の不具合により3年半ぶりに加速器のタンクを開いて修理を行ったことである。

2. 2005年の運転状況

2005年の前半は、 ^{14}C 測定システムの利用は順調に進行した。しかし、後半の11月10日に加速器に不具合が生じ3年半ぶりに加速器タンクをオープンし、部品の取替修理を行った。しかしながら、2004年と同様に、1年間の52週のうち39週間を運転することができた。測定手順としては、従来通り、45個のターゲット (^{14}C 濃度未知の試料32個、 ^{14}C 濃度標準体12個、システムバックグラウンド (ブランク試料である ^{14}C を含まないはずのグラフィット) 1個を標準的な組み合わせとする) について、1週間で3回繰り返し測定して再現性のテストを行い、また統計精度をあげることで、高い精度を達成している。Modern~5千年前の試料で ^{14}C 年代測定の誤差は $\pm 20 \sim \pm 35$ 年程度である。表1に年間の測定数と測定時間を示す。

表1 年ごとの測定数と測定時間

項目 年	測定ターゲット (個)		測定時間 (時間)	
	年間	月平均	年間	月平均
1999	330	28	352	29
2000	1,430	119	2,234	186
2001	2,077	173	3,161	263
2002	1,003	84	1,545	129
2003	1,979	165	3,219	268
2004	1,679	140	2,837	239
2005	1,771	148	3,456	288
合計	10,269		168,040	

また、次表に各月あたりの測定数と故障などの状況を示す。次の節で議論するように、タンデトロン2号機には2005年にも不具合の発生があったが、避けられない予定を除くとほぼ順調に稼働した。

表2 2005年における月当たりの測定ターゲット数

月	測定ターゲット数	状 況
1	187	1/26 クライオポンプ点検保守整備（業者による）
2	92	
3	183	
4	91	4/16-27 イオン源アイオナイザーの交換、出力の調整
5	188	5/5 クライオポンプの再生
6	188	6/27 高エネルギー分析電磁石電源の空冷開始
7	141	
8	191	8/11 ターボ分子真空ポンプ(TMP)の交換
9	92	9/10 空調機の室外機の不調
10	186	10/22 冷却水フィルター交換
11	92	11/10-23 ターミナルポンプ駆動系故障（プラスチック製歯車の破損）加速器タンク開による交換修理
12	140	12/1-16 電磁石電源故障、オランダへ返送修理

下図に、これまでに測定したターゲットである10,269個について種類の内訳を示す。約75%が未知試料である。次に、 ^{14}C 濃度の標準体、 ^{14}C バックグラウンド試料、IAEA標準体となっている。

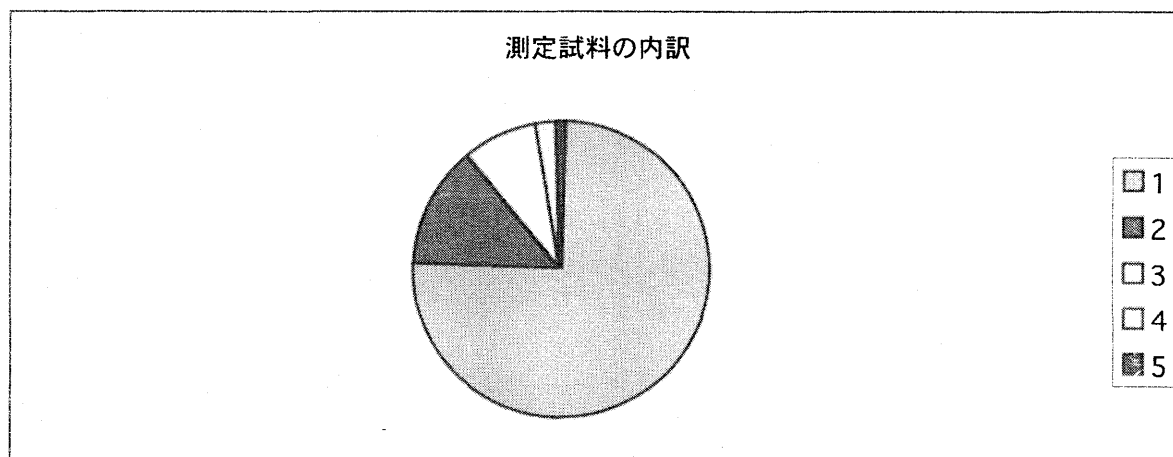


図1 これまでに測定したターゲットの種類の内訳

測定数の多い順に、1：未知試料，2：NBS-New 標準体，3：NBS-OLD 標準体，4： ^{14}C Background 試料，5：IAEA 標準体

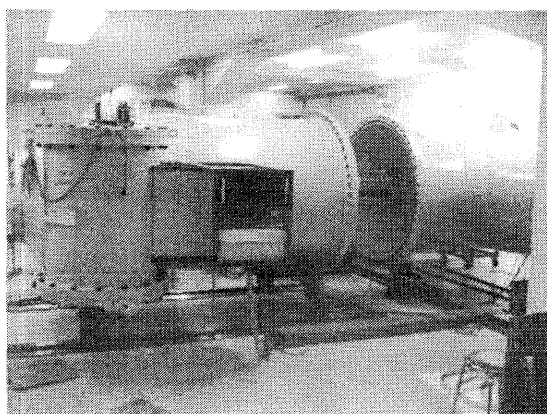
3. HVEE タンデトロン加速器質量分析計の故障例

表3に、2005年01月から2005年12月末までのタンデトロン2号機の不具合の状況を示す。主たる不具合は、1) イオン源のアイオナイザーを交換した際に新品のアイオナイザーがスムーズに働かなかったため調整に時間がかかったこと、2) 冷却水の冷却能力不足による高エネルギー分析電磁石電源の自動停止によ

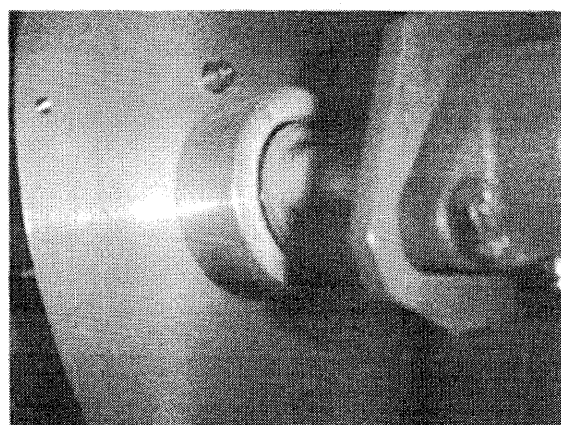
るトラブル、3) 加速器タンク内に設置されているターミナルポンプ（ターボ分子真空ポンプ）に電源を供給する発電機駆動系の故障、であった。ここでは、これらの3点について以下に詳述する。

表3 不具合の状況（2005/01～2005/12 まで）

2005/1/26	クライオポンプ点検保守整備（業者）
2005/4/16-27	イオン源アイオナイザーの交換，出力の調整
2005/4/29	高エネルギー分析電磁石電源が温度異常で停止
2005/5/5	クライオポンプの再生
2005/6/27	高エネルギー分析電磁石電源の空冷開始
2005/8/11	リコンビネーター部のターボ分子真空ポンプ（TMP）制御装置の故障によりTMP全面交換
2005/9/10	空調機の室外機不調，ラジエーターのファンを交換，
2005/10/22	冷却水フィルターの目詰まりによる流量不足、フィルター交換
2005/11/10-23	ターミナルポンプ駆動系故障（プラスチック製歯車の破損）， 加速器タンクオープンによる交換修理。修理の後に加速器放電が続出 イオン源ダイヤフラム型ポンプの交換
2005/12/1-16	電磁石電源故障，オランダへ返送修理



(1-a)



(1-b)

写真1 タンデトロン加速器質量分析計（加速器年代測定装置）の修理

(1-a)約3年半ぶりに加速器タンクを開き、タンク内部を点検した。

(1-b)写真の中央に見えるプラスチック製の歯車のかみ合わせがすり減り空回りをしていた。この歯車を新品と交換した。

3. 1 イオン源アイオナイザーの交換，出力の調整

本 AMS システムに用いられているマルチカソードの Cs スパッタ負イオン源（Model-864B）の炭素負イオン出力が低下し、セシウムリザーバー温度を 100℃以上にあげないと炭素ビームが出なくなった。また、ビームの時間安定性が悪くなったため、アイオナイザーの交換及びセシウムの再充填を行った。このあと、イオン源の調整を行ったところ、アイオナイザーからガスが放出されるらしく、引き出し電圧を正常値まで上げることが出来なくなった。そこで、日本原子力研究所むつ事業所の経験談を参考にして、アイオナイザーを徐々に調整した。この調整に1週間を要したが、何とか定常的な測定運転に達することが出来た。

3. 2 冷却水の冷却能力不足による高エネルギー分析電磁石電源の自動停止によるトラブル

高エネルギー分析電磁石電源は、水冷で作動している。室外にラジエーターと冷却装置があり冷却水を循環させている。電源には加熱防止のために温度スイッチが設置されているが、4月～6月にかけて、電磁石の使用中に、温度スイッチが作動して電磁石電源が停止したまま測定が継続される事故が頻発した。もちろん、タンデトロンは稼働しているが ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{12}C の同位体の測定は全く出来ていない。温度計を設置して、温度センサーの温度を調べたところ、温度センサーは規格通りに 80°C 以上になると接点が切れるという正常な動作をしていることが判明した。そこで、冷却能力を上げる方法をいくつか検討したが、最終的に、安易な手段として、扇風機による空冷を採用することにした。また、定常的に温度センサー付近の温度を監視することにした。

3. 3 加速器タンク内に設置されているターミナルポンプ駆動系の故障

前回の加速器タンクを開けての修理は2002年5月に行った。加速器高電圧の整流装置および交流高電圧電源の変圧装置が破損したため交換するという大修理である。修理の後に加速器タンクを閉めたのち、約3年半は加速器タンクを開くような修理は必要なかった。しかし、2005年11月14日(月)にタンクを開いて故障箇所を確認した。

11月10日16:00頃、加速器から異常に大きな雑音が短時間聞こえたあと、常音に戻った。しかし、それまで計数していた $^{14}\text{C}^{3+}$ をほとんど計数しなくなった。入射系は正常に作動していた。高エネルギー分析系は、イオンビームの収束、偏向電圧、分析電磁石電流、スリットの開閉を調べたが異常なしであった。そこで加速器本体が疑わしい。加速器高電圧は正常である。次に、ターミナル電源スイッチをオン・オフすると確かに、動力を伝えるモーターの一部は作動していることが確認できた。しかし、異常音の発生源は、タンデトロン分析計で唯一、物理的に作動しているターミナルポンプ駆動系しかあり得ない。そこで、3年半ぶりに加速器タンクを開いた。

加速器タンクの内部を点検すると、ターミナルポンプを駆動させるための発電機に動力を伝えるシャフトの歯車の歯先が摩耗して空回りをしていることを認めた。幸い、予備品があったため、短期間の内に、これを交換し、タンク内部を清掃したのち、タンクを閉じて、炭素同位体比測定を再開することが出来た。

3. 4 その他の故障

タンデトロン加速器の炭素イオンビームの入射に用いられているリコンビネーターは、グラファイトから生成される負イオンのうち、 ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{12}C の炭素同位体イオンを選別し、さらに ^{12}C イオン強度を約100分の一に減じて、加速器に導入する働きを持つ。リコンビネーターは、下流側のビーム分析系が正常に作動するためにビームの収束・上下左右方向の位置決めを行っており、微妙な調整を必要とする。今回、偏向電磁石の電流微調整用の電源が作動しなくなった。自力で、修理を試みたが上手くいかず、メーカーであるオランダのHVEE社に返送し修理を依頼した。2週間強で返送されてきたため、タンデトロン分析計の停止期間を最小限に抑えることが出来た。しかし、ターミナルポンプ駆動系の修理と併せて、測定試料が立て込む年末に、1ヶ月近く停止せざるを得なかったため、利用者に多大な迷惑をかけた。

4. 第5回放射性炭素測定国際比較の結果

この放射性炭素測定国際比較は、放射性炭素測定の国際機構の主催による、国際的な比較研究であり、過去に既に4回開催されている。名古屋大学の放射性炭素測定グループは第4回からこの企画に参加しており、既に報告を行っている(中村ほか、2002)。今回の第5回目の比較研究(Fifth International Radiocarbon Inter-comparison; VIRI)は、試料が2004年8月に配布され、結果報告が2005年5月末日に締め切られ、その概要の報告が、主催者であるスコットランドのグラスゴー大学のScott教授により、米国カリフォルニア大学パー

クレー校にて開催された第 10 回加速器質量分析国際会議 (AMS-10) にて行われた。その概要によると、参加した ^{14}C 測定機関は 66 機関 (前回の第 4 回国際比較 FIRI の数値を以下に括弧で比較して示す ; 92 機関)。この 66 機関のうち、AMS (加速器質量分析法) が 32 機関 (25 機関)、LSC (液体シンチレーション法) が 31 機関 (49 機関)、GPC (ガス比例計数管法) が 10 機関 (18 機関) であった。また、日本からの参加は名古屋大学及び東京大学の 2 機関であり、共に AMS 法による測定を行っている。相対的には AMS 法研究機関の参加が増加していることがわかる。配布された試料は 4 点であり、近年に収穫され、 ^{14}C 濃度が高い barley mash (オオムギをつぶしたもの) が 2 点、各 2 g ずつ、また、考古学資料として、charred seed (炭化穀物) が 2 点、各 4 粒ずつであった。各資料について、グラファイトを独立に 2 個ずつ作成して、測定した結果を、国際機関で測定された結果と比較して表 4 に示す。

表 4 VIRI の結果と名古屋大学の結果との比較

試料番号	平均値	最頻値	標準偏差	最小値	最大値	名古屋大 ($\pm 1\sigma$)
A (pMC)	108.6	109.1	2.78	92	113.0	109.6 \pm 0.3 109.7 \pm 0.3
B (BP)	2825	2821	198.7	2460	3979	2752 \pm 25 2803 \pm 28
C (pMC)	109.8	110.6	2.35	98.6	112.6	110.7 \pm 0.3 110.9 \pm 0.3
D (BP)	2859	2835	185.2	2580	3998	2811 \pm 25 2832 \pm 25

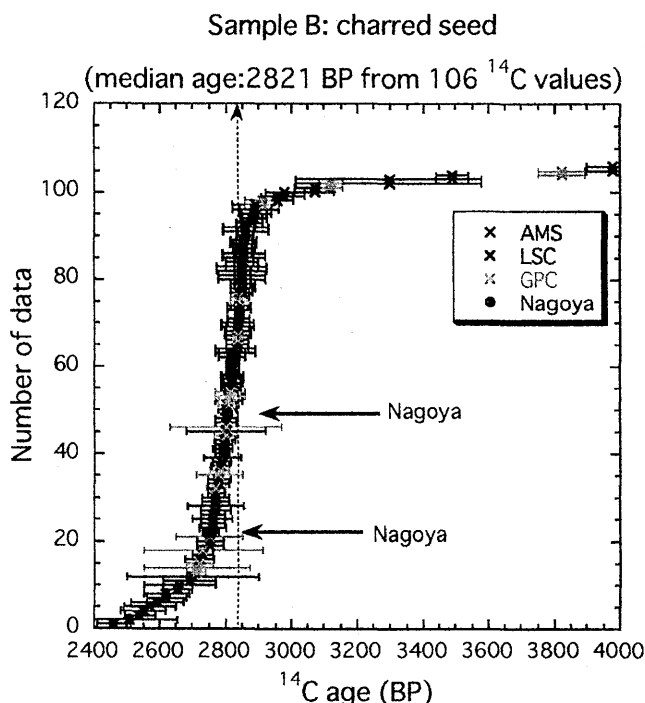


図 2 試料 B について、国際機関で測定された結果の比較
名古屋大学の測定結果を矢印で示す。

比較の結果をまとめると、国際機関で測定された結果の最頻値に比べて名古屋大学の結果は、 ^{14}C 濃度がや

や高い方、また、同様な傾向であるが ^{14}C 年代が若い方向にずれていることがわかる。一例として、試料 B について、国際機関で測定された結果の比較を図 2 に示す。結果の詳細は別途報告する予定である。

5. ^{14}C 測定の実用研究

5 千年前よりも若い試料では、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) ため、文化財科学や考古学関連のさまざまな資料の年代測定に利用が期待されている。個々の応用例については、紙面の都合上ここでは論じない。本報告書や、既刊の名古屋大学加速器質量分析計業績報告書 (1988~2005) に掲載されている報文を参考にして頂きたい。

謝辞

タンデトロン加速器質量分析計の修理、保守において、全学技術センターの教育・研究技術支援室装置開発技術系 (旧理学部装置開発室) の皆様には大変お世話になった。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書(1988~2005) (I ~ XVI)、名古屋大学年代測定総合センター。
中村俊夫・小田寛貴・丹生越子・池田晃子・南 雅代・高橋 浩・太田友子 (2002) ^{14}C 年代測定の国際比較研究 FIRI の結果について。名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XIII, 29-40。
Nakamura, Toshio, Etsuko Niu, Hirotaka Oda, Akiko Ikeda, Masayo Minami, Tomoko Ohta and Takefumi Oda (2004) High precision ^{14}C measurement with the HVEE Tandetron AMS system at Nagoya University. *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res. B* 223-224, 124-129。
丹生越子、ほか (2002) 名古屋大学タンデトロン 2 号機の現状。第 15 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、2002 年 6 月 24-25 日、於：サンピア敦賀、(財) 若狭湾エネルギー研究センター、17-20。
丹生越子 (2004) 名古屋大学タンデトロン 2 号機の現状。名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XV, 7-12。

Status and applications of Tandetron AMS system-II at Nagoya University

Toshio NAKAMURA*, Masayo MINAMI, Hirotaka ODA, Akiko IKEDA,
Takahiro WATANABE, Tomoko OHTA, Shigeo YOSHIOKA and Masami NISHIDA

Center for Chronological Research, Nagoya University, Chikusa, Nagoya 464-8602 Japan
(corresponding author: e-mail:nakamura@nendai.nagoya-u.ac.jp, Phone:052-789-3082)

Abstract

A second ^{14}C -AMS system (Model 4130-AMS), built by High Voltage Engineering Europe (HVEE), B.V., The Netherlands, was delivered to Nagoya University in 1996/97. Acceptance tests were completed in January of 1999, and routine measurements began in mid-2000. Since completion of the acceptance tests in early 1999, we have encountered a lot of trouble with the machine, in particular in 2002. We have replaced a RF-transformer for high voltage generation system, a GVM motor to measure high voltage applied to the terminal of the tandem accelerator, etc, in 2002. After these troubles, the machine is relatively working well, expect for minor problems. However, it should be stressed that even a minor malfunction, ^{14}C measurements are not possible with the system.

The numbers of targets measured were 330, 1430, 2077, 1003, 1979 and 1679 in the years 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, respectively. In 2005, we have measured totally 1771 targets during the machine operations of 39 weeks. Thus the total number of targets measured was over 10,000 at the end of November in 2005.

In 2005, we have finally opened the accelerator tank again after three years and a half from the severe machine trouble in 2002. The problem this time was a disorder of power transport system to the terminal pump (turbo molecular pump) that is equipped on the high voltage terminal of the accelerator tank to circulate argon gas efficiently for electron stripping from negative carbon ions. The repair of the damaged system was done in two weeks. In spite of other minor but many problems, we can now continue ^{14}C measurements with our AMS system.