

JAERI-Tech  
2000-004



JP0050318



## タンデム型加速器質量分析装置の整備

2000年2月

水島俊彦・外川織彦・水谷義彦・甲 昭二\*・山本忠利

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

タンデム型加速器質量分析装置の整備

日本原子力研究所むつ事業所施設部

水島 俊彦・外川 織彦・水谷 義彦・申 昭二\*・山本 忠利†

(2000年1月5日受理)

日本周辺海域等から海水試料を採取し、その中に含まれている極微量の放射性炭素<sup>14</sup>についてその水平方向及び鉛直方向の分布状況を測定分析し、海水の混合及び循環などの過程についてその機構を解明するため、タンデム型加速器質量分析装置(以下「タンデトロン」という。)を1997年4月むつ事業所大湊施設に設置した。タンデトロンは、主に炭素の同位体比を測定するラインと質量数の重いヨウ素の同位体比を測定するラインから構成される。炭素ラインは、整備が終了して海水試料の測定を開始している。また、ヨウ素ラインは、原子力施設及び再処理施設から放出される放射性ヨウ素<sup>129</sup>の元素分析に利用でき、現在、最終段階である飛行時間型検出器による測定精度の確認のための調整を行っている。

本報告は、炭素ライン及びヨウ素ラインの整備状況についてまとめたものであり、これまでの調整状況、タンデトロンの概要、測定性能に関する試験、遮蔽性能に関する評価及び検査、問題点とその改善対策等について記述したものである。

---

\*むつ事業所：〒035-0064 青森県むつ市港町4-24

†東海研究所バックエンド技術部

・(財)日本海洋科学振興財団むつ海洋研究所

Installation of a Tandem-type Accelerator Mass Spectrometer

Toshihiko MIZUSHIMA, Orihiko TOGAWA, Yoshihiko MIZUTANI,  
Shojo KABUTO\* and Tadatoshi YAMAMOTO<sup>†</sup>

Department of Facilities  
Mutsu Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Minato-machi, Mutsu-shi, Aomori-ken

(Received January 5, 2000)

Tandem-type accelerator mass spectrometer (hereinafter referred to as Tandetron) was installed at the Ominato Facility of Mutsu Establishment, JAERI in April, 1997. The objective of its installation is to investigate the mechanism of the mixing and circulation of seawater in the ocean, by collecting seawater samples around Japan and analyzing the horizontal and vertical distributions of  $^{14}\text{C}$  contained in the samples. The Tandetron consists of two lines to measure isotopic ratios of carbon and those of heavier iodine. The adjustment for the carbon line was finished and the measurements of seawater samples were started. The iodine line, on the other hand, is on the final step of its adjustment and performance tests are being carried out with a TOF (Time of Flight) detector. The iodine line will be used to analyze  $^{129}\text{I}$  released from a spent nuclear fuel reprocessing plant and other nuclear facilities.

In this report, we summarize the status of installation of the carbon and iodine lines for the Tandetron. The report describes the situations of their adjustments until now, the outline of the Tandetron, tests of measurement performance, evaluation and inspection of shielding performance, problems and their solutions, and so on.

Keywords: AMS, Tandetron, Carbon-14, Iodine-129

---

\* Mutsu Marine Laboratory, Japan Marine Science Foundation

+ Department of Decommissioning and Waste Management,

Tokai Research Establishment

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 調整状況 .....	2
3. タンデotronの概要 .....	4
3.1 イオン源 .....	4
3.2 イオン入射システム部 .....	4
3.3 タンデム型加速器部 .....	4
3.4 高エネルギーイオン質量分析部 .....	5
4. 測定性能に関する試験 .....	20
4.1 $^{14}\text{C}$ 測定に係わる機器の性能試験 .....	20
4.2 $^{14}\text{C}$ 測定精度に関する試験 .....	30
4.3 $^{129}\text{I}$ 測定に係わる機器の性能試験 .....	34
4.4 $^{129}\text{I}$ 測定精度に関する試験 .....	52
5. 遮蔽性能に関する評価及び検査 .....	57
5.1 発生放射線の位置及び強度 .....	57
5.2 加速器本体からのX線による線量当量率及び線量当量 .....	58
5.3 評価結果のまとめ .....	58
5.4 遮蔽性能検査 .....	59
6. 問題点とその改善対策 .....	63
6.1 SF <sub>6</sub> ガスの水分除去 .....	63
6.2 ターゲットプレス機の製作 .....	64
7. おわりに .....	68
謝辞 .....	68
参考文献 .....	68

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Situations of Adjustments .....	2
3. Outline of the Accelerator Mass Spectrometer (Tandetron) .....	4
3.1 Ion Source .....	4
3.2 Ion Injection System .....	4
3.3 Tandem-type Accelerator .....	4
3.4 High Energy Ion Mass Spectrometer .....	5
4. Tests for Measurement Performance .....	20
4.1 Performance Tests for a Line on $^{14}\text{C}$ Measurement .....	20
4.2 Acceptance Tests for $^{14}\text{C}$ Measurement .....	30
4.3 Performance Tests for a Line on $^{129}\text{I}$ Measurement .....	34
4.4 Acceptance Tests for $^{129}\text{I}$ Measurement .....	52
5. Evaluation and Inspection of Shielding Performance .....	57
5.1 Position and Intensity of Radiation .....	57
5.2 Dose Equivalent Rate and Dose Equivalent due to X-ray from the Accelerator .....	58
5.3 Summary of Evaluation .....	58
5.4 Inspection of Shielding Performance .....	59
6. Problems and their Solutions .....	63
6.1 Removal of Water Contents from SF <sub>6</sub> Gas .....	63
6.2 Manufacture of a Machine to Press Targets .....	64
7. Summary .....	68
Acknowledgement .....	68
References .....	68

## 1. まえがき

海洋環境における放射性核種の移行挙動に関する調査研究を行う目的で、日本原子力研究所むつ事業所に海洋調査研究室が 1995 年 10 月に新設された。当研究室では、海洋調査研究の一環として、海水の循環に関する研究を実施するために、環境試料等に含まれている極微量の放射性同位元素の検出及び同位体比を短時間に高精度で測定できるタンデトロンを導入する計画をし、オランダのハイボルテージエンジニアリングヨーロッパ社 (HVEE社) から輸入した。今回導入したものと同じタイプとしては、米国のウッズホール海洋研究所を始めとして、オランダのグローニングデン大学、ドイツのクルスチャン・アルブレヒツ大学、韓国のソール大学に、我が国では名古屋大学に設置され、海洋学研究、考古学等の研究に利用されている。

海水の動きと同じ挙動をとる化学トレーサーとしての<sup>14</sup>C の放射性核種の濃度を測定して、海水の表面から潜り込んでからの経過時間を求ることによって、海水の循環がどのように行われているかを解析することなどの海洋学研究に画期的な成果が期待できることに着目して、タンデトロンを 1997 年 4 月むつ事業所大湊施設に設置した<sup>1), 2)</sup>。タンデトロンは、59 個の試料を一度にイオン源に装着して、連続的に測定できるようにコンピューター制御しており、多数の試料を測定できる第 2 世代型の加速器質量分析装置である。

タンデトロンは、炭素ライン及びヨウ素ラインから構成され、このうち炭素ラインについてイオン源及びイオン入射システム部、タンデム加速器部、高エネルギーイオン質量分析部等の各部分のアライメントを終了し、炭素ビームを発生させシステム全体の調整を 1998 年 5 月末に終了した。さらに、6 月 8 日及び 9 日に<sup>13</sup>C / <sup>12</sup>C 及び<sup>14</sup>C / <sup>12</sup>C の測定精度の確認を行い良好な結果を得ることができた。その後、ヨウ素ラインのアライメント・調整に着手して 1999 年 10 月 12 日及び 13 日に重イオン検出器を用いて、<sup>129</sup>I / <sup>127</sup>I の測定精度の確認を行い良好な結果を得ることができた。今後、最終目的である飛行時間型検出器をヨウ素ラインに設置して<sup>129</sup>I / <sup>127</sup>I の測定精度の確認を行う予定である。

本報告は、これまでの調整状況、タンデトロンの概要、測定性能に関する試験、遮蔽性能に関する評価及び検査、問題点とその改善対策等について述べたものである。

## 2. 調整状況

タンデトロンを大湊施設内の研究棟へ据付けした後、1997年5月から炭素ラインについて調整作業を開始し、9月末にイオン源及びイオン入射システム部のイオンビーム通しの確認が終了した。一方、同等の機種が納入されている名古屋大学では、加速管の高エネルギー側でビームがセンターラインに対して上がっていることが分かり、メーカーの工場に返送して調査した結果、高エネルギー側の加速管の両サイドのフランジの平行性、同心円性等の微妙なズレが確認された。そこで、同時期に作られている日本原子力研究所の加速管についても、アライメントツールを使用してチェックした結果、同様の不具合が発見された。

加速管が機械的に製造図面どおりに製作されていないために、今後の装置運転上で、支障を来す可能性があり、当初の設計どおりに加速管を修理することになり、メーカーの工場に返送した。工場内で加速管を分解し各パーツの精度確認を行った後、加速管の再組立を行い修理完了後大湊施設に返送した。再びタンデム加速器部及び高エネルギーイオン質量分析部のアライメントを11月中旬から行い、ビームラインが床面から高さ1200mm ±1mm位置で通過するように各機器を調整した後、炭素ビームを発生させ、システム全体のビーム調整を行いながら各機器の性能確認を1998年5月末までに行い、6月に<sup>14</sup>Cの測定精度の確認を行った。その後、原研で作製した標準試料、ブランク、未知試料を用いて測定条件等を決定し海水試料の測定を開始している。

一方、ヨウ素ラインについても1997年5月から調整作業を開始したが、高エネルギーイオン質量分析部の静電型アナライザーに高電圧を印加しようとしたところ、電圧が上がらず、高電圧を絶縁するインシュレータに絶縁不良が発生したことが原因であることが判った。そこで、メーカーの工場にヨウ素ラインを1997年6月中旬に送り、不具合の修理及び改造を行うことにした。ヨウ素ラインの修理及び改造が終了し、1998年3月中旬に大湊施設に再搬入され機械的な組立を行い、炭素ラインと連結し、3月下旬「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」に基づく施設検査を受検し合格した。ヨウ素ラインについては、7月末からアライメントを開始し1999年2月に重イオン検出器により<sup>129</sup>Iが検出できることを確認した。その後、各機器（電磁石、ステアラー、レンズ、ストリバーガス圧等）の調整を行い、10月に重イオン検出器により<sup>129</sup>Iの測定精度の確認を行った。さらに、重イオン検出器を取り外し飛行時間型検出器を設置し調整を行っている（表1参照）。

表1 タンデトロンの調整状況

項目	年度				1997年度				1998年度				1999年度			
	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
1. タンデトロンの設置	[■]															
2. 炭素ライン					[■]	[■]										
①アライメント・調整	[■]	[■]														
②ビーム通し試験		[■]														
③加速管の修理			[■]													
④ $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 精度確認				[■]												
⑤施設検査					[■]											
⑥試料測定						[■]										
⑦本格的な試料測定							[■]									
3. ヨウ素ライン																
①静電型アナライサーの修理								[■]								
②アライメント・調整									[■]	[■]						
③ $^{129}\text{I}$ の検出																
④ $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 精度確認 (電離線検出器による)										[■]						

注) 飛行時間型検出器による $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 精度確認は、2000年度に行う。

### 3. タンデムトロンの概要

タンデムトロンは、主に炭素の同位体比を測定するラインと質量数の重いヨウ素の同位体比を測定するラインから構成されている。また、タンデムトロンは、イオン源、イオン入射システム部、タンデム型加速器部及び高エネルギーイオン質量分析部の4つの部分に分けられる。タンデムトロンの配置、構成及び全体をそれぞれ図1、図2及び写真1に示す。

#### 3. 1 イオン源

イオン源は、炭素、ヨウ素とも同タイプのセシウムスパッター型負イオン源(HVEE社製、型式846B)で、その構造及び全体を図3及び写真2に示す。このイオン源は、59試料をマルチターゲット部(写真3)に入れてコンピュータにより自動的に連続測定できるように設計されている。セシウムイオンビームは、 $350\mu\text{m}$ まで収束することができ微量の試料でも測定が行える。また、コンピュータにより試料(試料固定台)を自動的にX-Y方向( $\pm 2.5\text{mm}$ の幅で移動可能)に走査させ、イオンビームのスパッターによるクレーター効果を抑えることができる。

炭素のイオン源は、通常ターゲット電圧(ターゲットとアイオナイザ間)を7KV、引き出し電圧を28KVで印加するため、ここから発生する負の炭素イオンは、35KeVのエネルギーをもってイオン入射システム部に導かれる。また、セシウムオープン温度は、最大400°Cまで可変設定ができその設定温度を一定に保つように自動制御されている。

#### 3. 2 イオン入射システム部

炭素のイオン入射システムは、リコンビネータと呼ばれる入射系を採用しており、4台の45°電磁石と2台の静電型スロットレンズから構成され、その構造及び全体を図4及び写真4に示す。リコンビネータは、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ のイオンを同時に入射させることにより、装置に起因する同位体効果をなくすことができる。またリコンビネータの中間部において、 $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ のビームをそれぞれ約2cm間隔に分離し、 $^{12}\text{C}$ ビームを10回転/秒で回転するチョッパー(アルミニウム製で円周方向に24個のV型スリットがある円盤)で1/97に低減させ $^{14}\text{C}$ ビーム強度を相対的にあげて分析時間の短縮を図っている。また、 $^{12}\text{C}$ ビームを低減させることにより、加速器の負担を抑えて二次電子に起因するX線を低減させている。

ヨウ素のイオン入射システムは、アナライザ電磁石に内蔵されたバウンサー機構を有している(写真5)。この機構は、電磁石の磁界を変化させずに高速でイオンの加速エネルギーを変化させることにより、個々の質量を持ったイオンを逐次透過させ加速器に入射させることができる。

#### 3. 3 タンデム型加速器部

タンデム型加速器部は、高電圧発生部(写真6)、Q-Snoutレンズ、低エネルギー加速管(写真7)、荷電変換部(写真8)、高エネルギー加速管(写真9)、四重極型レンズから構成されて

いる。加速器本体は、ターミナル電圧が3MVまで昇圧できるコッククロフト・ウォルトン型電圧発生方式を採用しており、その昇圧回路を図5に示す。この昇圧回路は、高周波数電源(35KHz)を整流する方式で、すべてソリッドステード化し安定した高電圧を供給できる。ターミナル電圧の制御は、発電型電圧計(GVM)の計測値と設定値を比較して制御する方法(GVM制御)と $110^{\circ}$ 電磁石後の $^{13}\text{C}$ ファラデーカップ内に設けられた左右のスリットに流れる電流が等しくなるように制御する方法(スリットフィードバック制御)の二通りがある。この方法の切り替えは、CRT上の「 $^{14}\text{C}$  slit enable」をon、offすることにより切り替えでき、onでスリットフィードバック制御が行えoffでGVM制御が行える。 $^{14}\text{C}$ 測定中はスリットフィードバック制御で行う。 $^{129}\text{I}$ 測定についても、 $115^{\circ}$ 電磁石後の $^{127}\text{I}$ ピックアップファラデーカップ内に設けられたスリットにより、同様にスリットフィードバック制御が行える。

低エネルギー(L.E.)加速部及び高エネルギー(H.E.)加速部には、それぞれ2216.4mm及び2565.2mm(発電機用駆動モーター部を含む。)の長さの加速管が設置されている。この加速管には、それぞれ80個の分割抵抗が加速電極間に接続され均等な電位勾配を作っている。分割抵抗は、L.E.加速管のR1及びR2(図5参照)が $60\text{M}\Omega$ に、他の分割抵抗は $500\text{M}\Omega$ に設計されている。表2に分割抵抗の実測結果を示す。ターミナル電圧が定格3MVにおいては、通常L.E.加速管で $76.7\mu\text{A}$ 、H.E.加速管で $75.0\mu\text{A}$ が大地に電流が流れている。

加速管は、ホウケイ酸ガラス(絶縁物)とチタン電極を特殊な接着剤で接合したもので、二次電子を低減させるために加速管に永久マグネットを螺旋状に取り付けている。加速管の外径は、32cmと大きいものを使用しているため真空排気特性が向上され、高電圧ターミナル近傍で良い真空度が得られる設計となっている。さらに、高電圧ターミナル部の荷電変換部の口径を大きくすることができ、加速器に入射されたイオンがQ-Snoutレンズにより全て荷電変換部に取り込む構造となっている。

荷電変換は、高電圧ターミナルのウィンドレス荷電変換カナル内のストリッパガス(アルゴンガス)で行われる。L.E.加速管で加速された負イオンがアルゴンガス中を通過することによりガス分子と負イオンが衝突して、外殻電子が剥ぎ取られn価の正イオンに変換される。正イオンの価数は、アルゴンガス圧により決定されるが直接この圧を計測することができないため、入口部(L.E.加速管側)のQ-Snoutレンズ部に設置されている真空ゲージ(HV3)で換算する。

例えば、炭素イオンでは、測定に関する試験結果から3価の正イオンを得るために、HV3で $1.3 \sim 1.5 \times 10^{-6}\text{mBar}$ になるようにアルゴンガス圧を調整している。荷電変換カナルより漏れだしたアルゴンガスは、加速管内の真空中上のために高電圧ターミナル部にターボポンプを設け、ガスを回収してカナル中央部に循環させている。

加速器タンク内の絶縁には六弗化硫黄( $\text{SF}_6$ )ガスを使用し、約8barの圧まで充填している。

### 3. 4 高エネルギーイオン質量分析部

高エネルギーイオン質量分析部は、炭素ラインとヨウ素ラインから構成されている。

炭素ラインの高エネルギーイオン質量分析部は、 $110^{\circ}$ 電磁石、 $90^{\circ}$ 電磁石、静電アナライザ、重イオン検出器から構成されている(写真10)。加速器を通過した $^{12}\text{C}$ 、 $^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}$ のイオ

ンは、初段の110°電磁石によりそれぞれ質量分離され、 $^{12}\text{C}$  と $^{13}\text{C}$  イオンビームは、ファラディカップにより電流測定される。 $^{14}\text{C}$  のイオンは、さらに静電アナライザー、90°電磁石で分析され重イオン検出器でパルスカウントされる。重イオン検出器は、入射イオンによる電離作用を利用したガスカウンターで、検出器内にはイソブタン( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ )が20mbar封入されている。

ヨウ素ラインの高エネルギーイオン質量分析部は、115°電磁石、静電アナライザー、飛行時間型検出器から構成されている(写真11)。加速器を通過したヨウ素のイオンは、初段の115°電磁石により質量分離され、 $^{127}\text{I}$  イオンビームは、ファラディカップにより電流測定され、 $^{129}\text{I}$  のイオンは、飛行時間型検出器でそれぞれのイオン速度の違いから識別されている。

以上の4つの部分からなる加速器質量分析システム全てを写真12に示したコンピュータにより制御及び監視を行う。

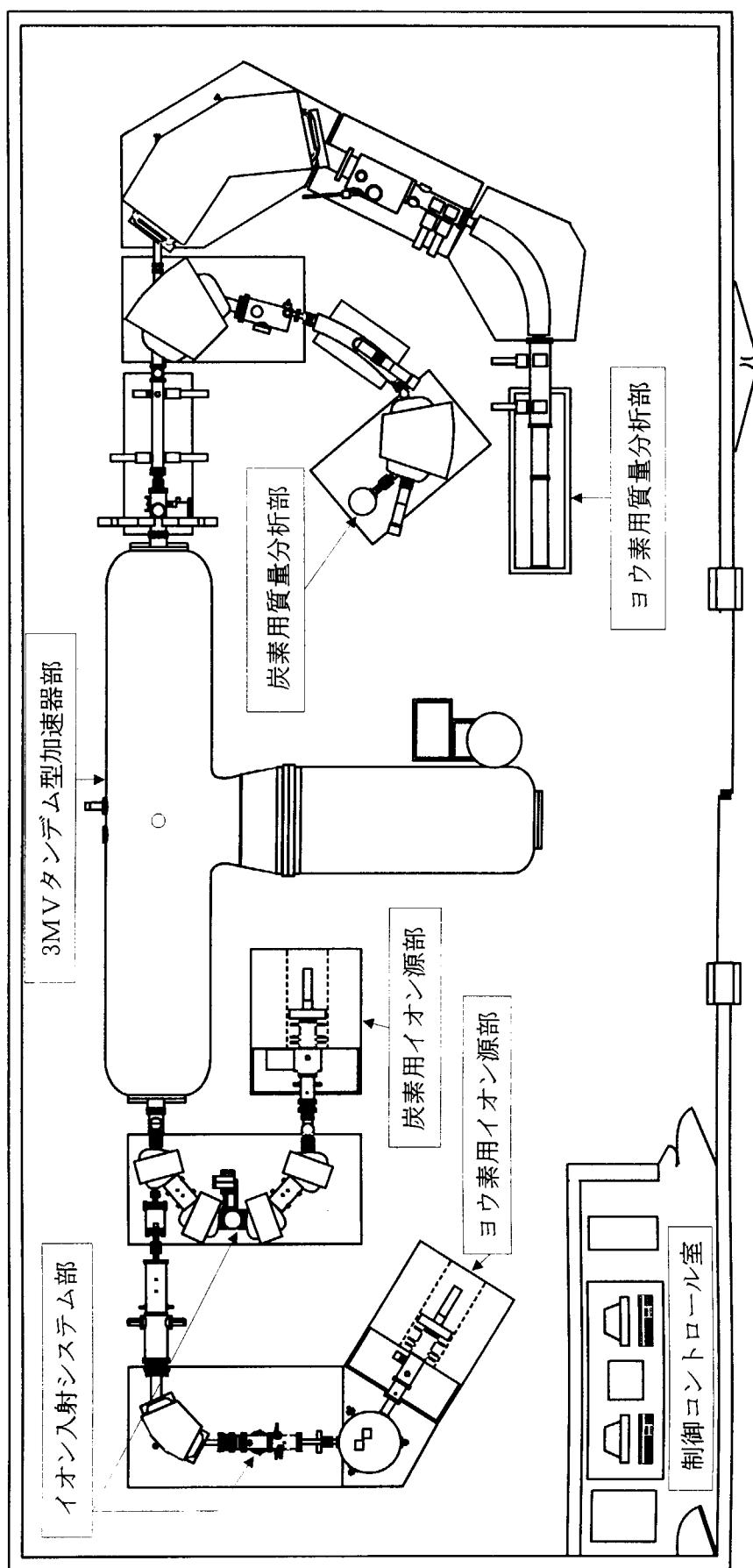


図1 タンデムトロンの配置

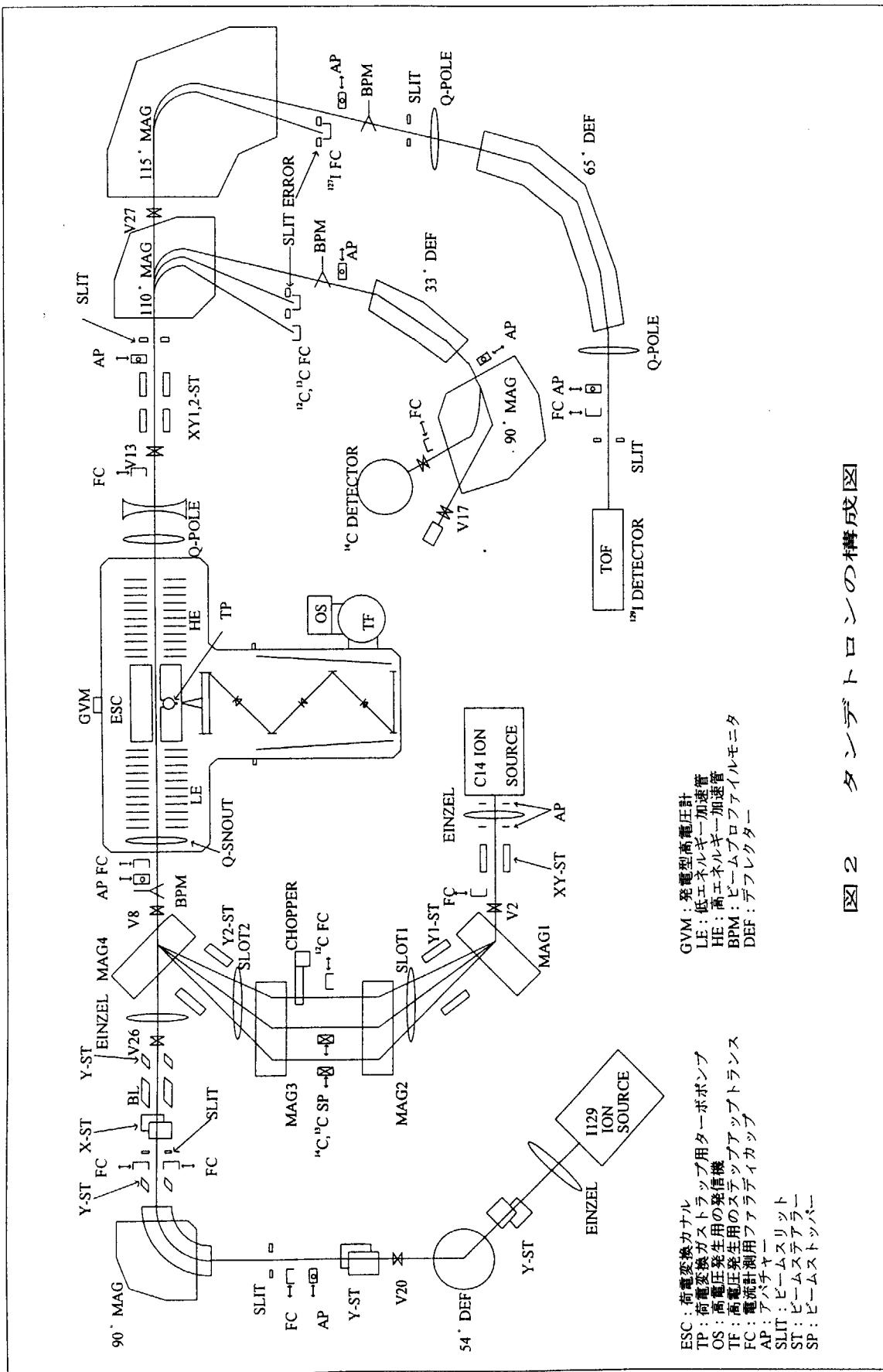


図2 タンデムトロトンの構成図

ESC : 荷電変換カナル  
 TP : 荷電変換ガストラップ用ターボポンプ  
 OS : 高電圧発生用の送信機  
 TF : 高電圧発生用のステッピングトランジスタ  
 FC : 電源供給用のアラティカシブ  
 GVM : 純電型高電圧計  
 LE : 低エネルギー加速管  
 HE : 高エネルギー加速管  
 BPM : ビームプロファイルモニタ  
 DEF : デフレクター

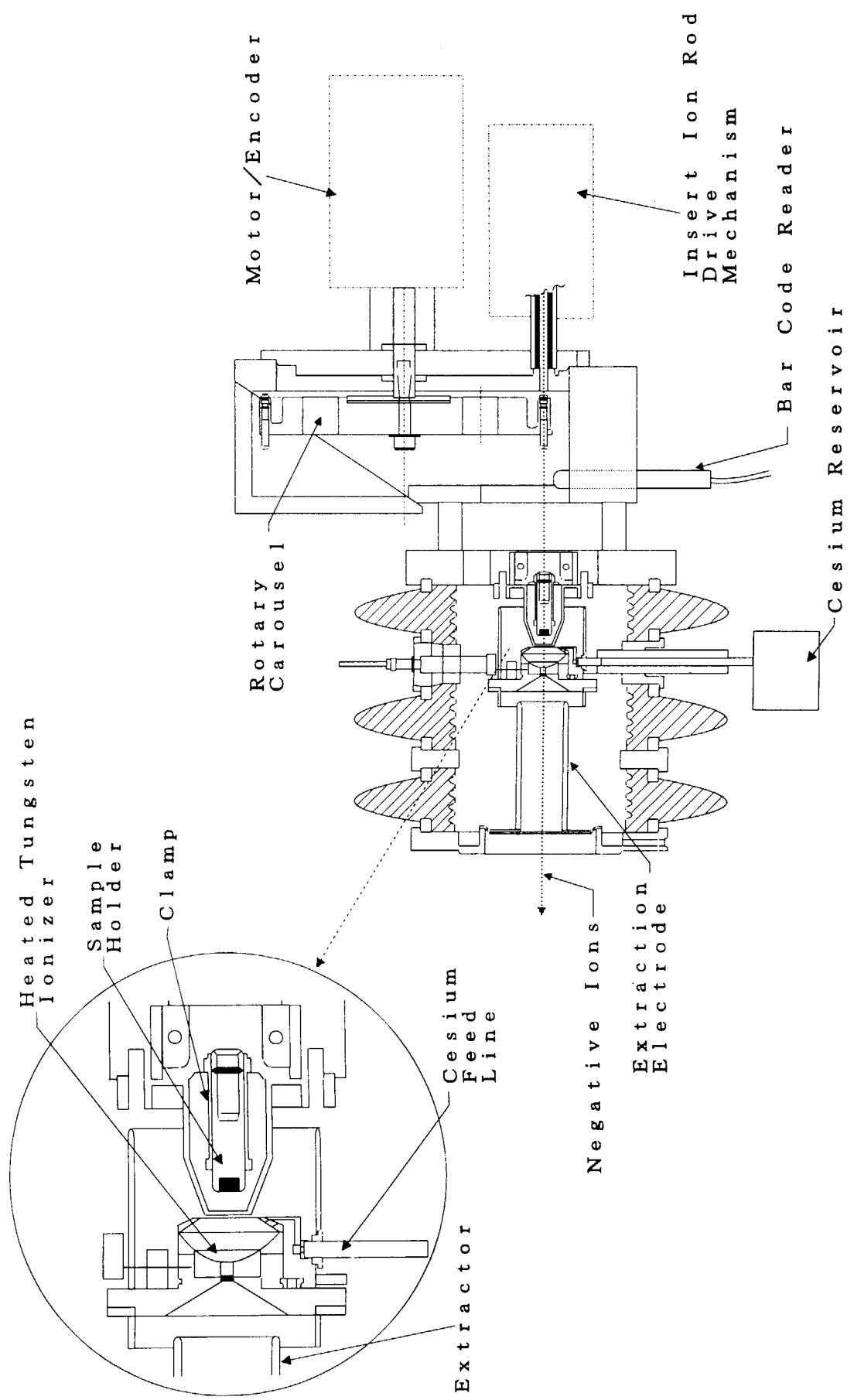


図3 イオノン源の構造

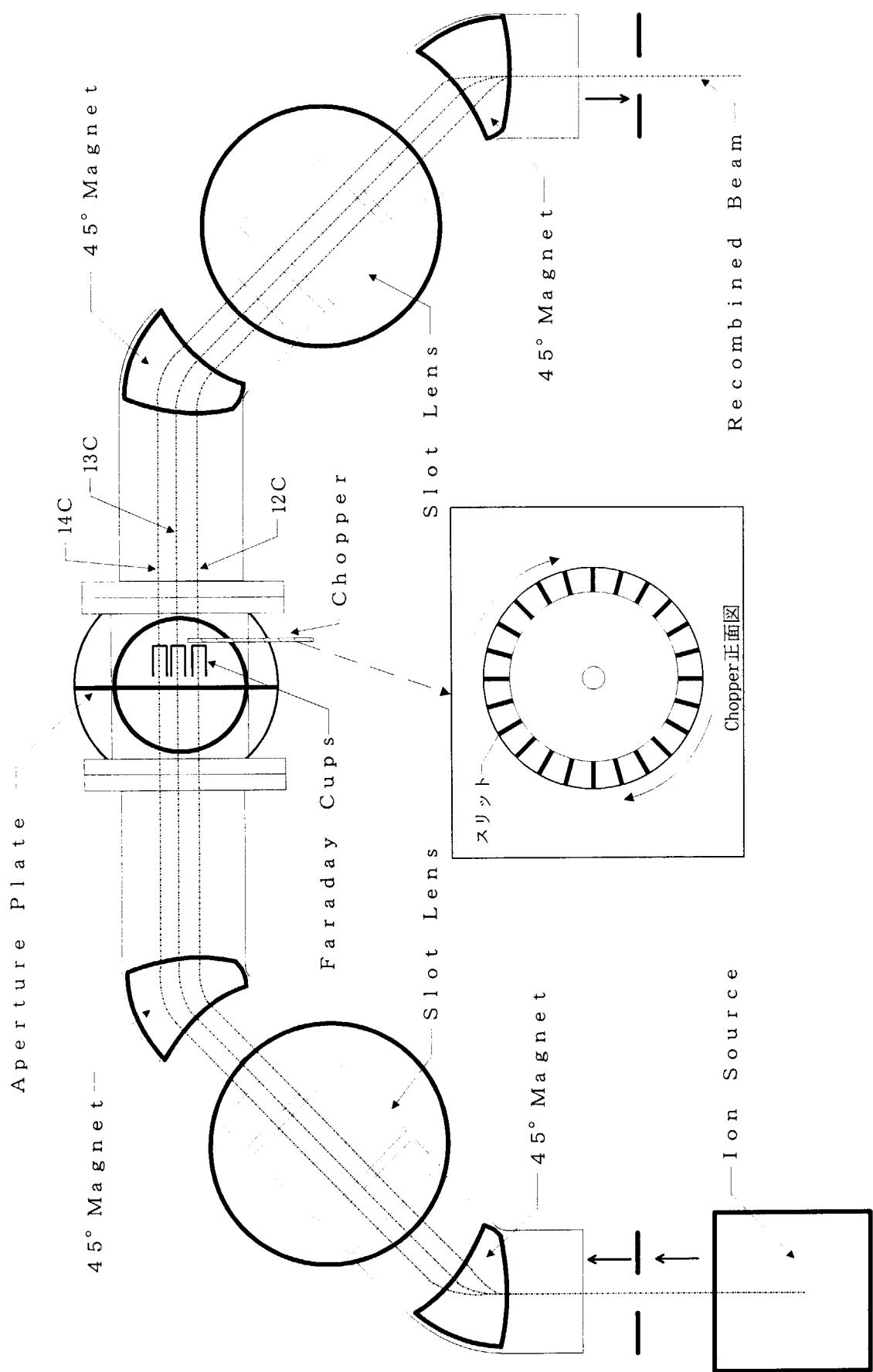


図4 岩素のイオン入射システム（リコンビネータ）

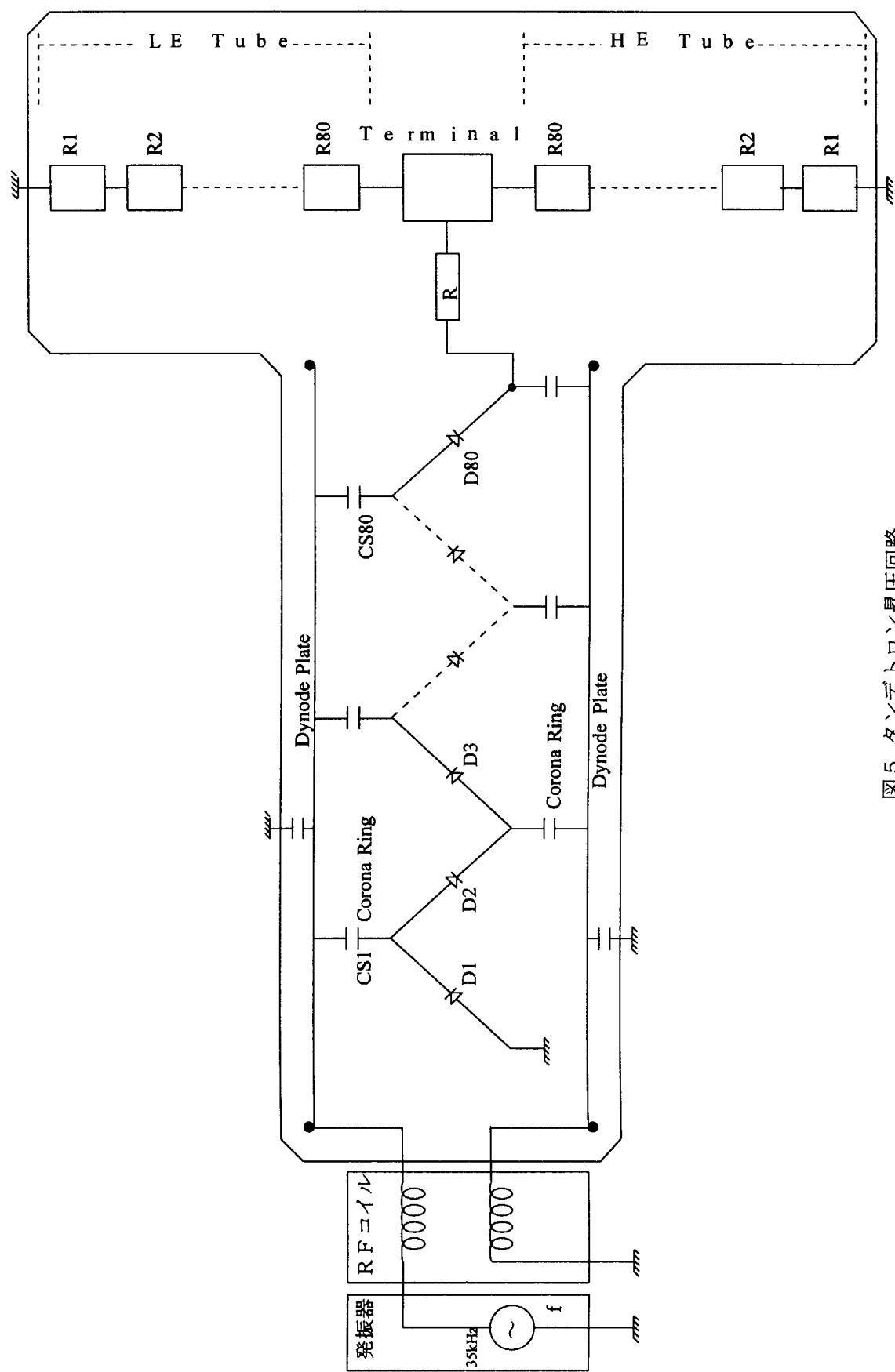


図5 タンデムトロン昇圧回路

表2 加速管分割抵抗測定結果

HE加速管							
No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)
1	489	21	488	41	493	61	496
2	484	22	482	42	491	62	498
3	488	23	494	43	500	63	498
4	491	24	490	44	490	64	500
5	484	25	493	45	498	65	496
6	485	26	485	46	498	66	496
7	484	27	490	47	487	67	497
8	483	28	487	48	495	68	499
9	489	29	492	49	491	69	499
10	491	30	487	50	493	70	502
11	479	31	497	51	499	71	501
12	486	32	488	52	498	72	498
13	479	33	491	53	498	73	507
14	494	34	487	54	497	74	502
15	498	35	492	55	497	75	500
16	498	36	493	56	497	76	501
17	490	37	495	57	496	77	500
18	496	38	496	58	497	78	504
19	493	39	492	59	497	79	500
20	487	40	487	60	502	80	501

LE加速管							
No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)	No.	抵抗(MΩ)
1	488	21	485	41	495	61	500
2	489	22	486	42	500	62	500
3	487	23	483	43	498	63	498
4	493	24	488	44	495	64	500
5	485	25	493	45	494	65	505
6	493	26	493	46	496	66	503
7	485	27	486	47	502	67	501
8	482	28	496	48	500	68	502
9	493	29	482	49	498	69	500
10	485	30	493	50	502	70	499
11	484	31	492	51	500	71	499
12	497	32	483	52	504	72	500
13	489	33	497	53	506	73	500
14	496	34	494	54	500	74	503
15	485	35	495	55	499	75	503
16	491	36	488	56	499	76	503
17	498	37	500	57	501	77	500
18	486	38	490	58	496	78	501
19	488	39	492	59	503	79	60
20	487	40	496	60	503	80	60

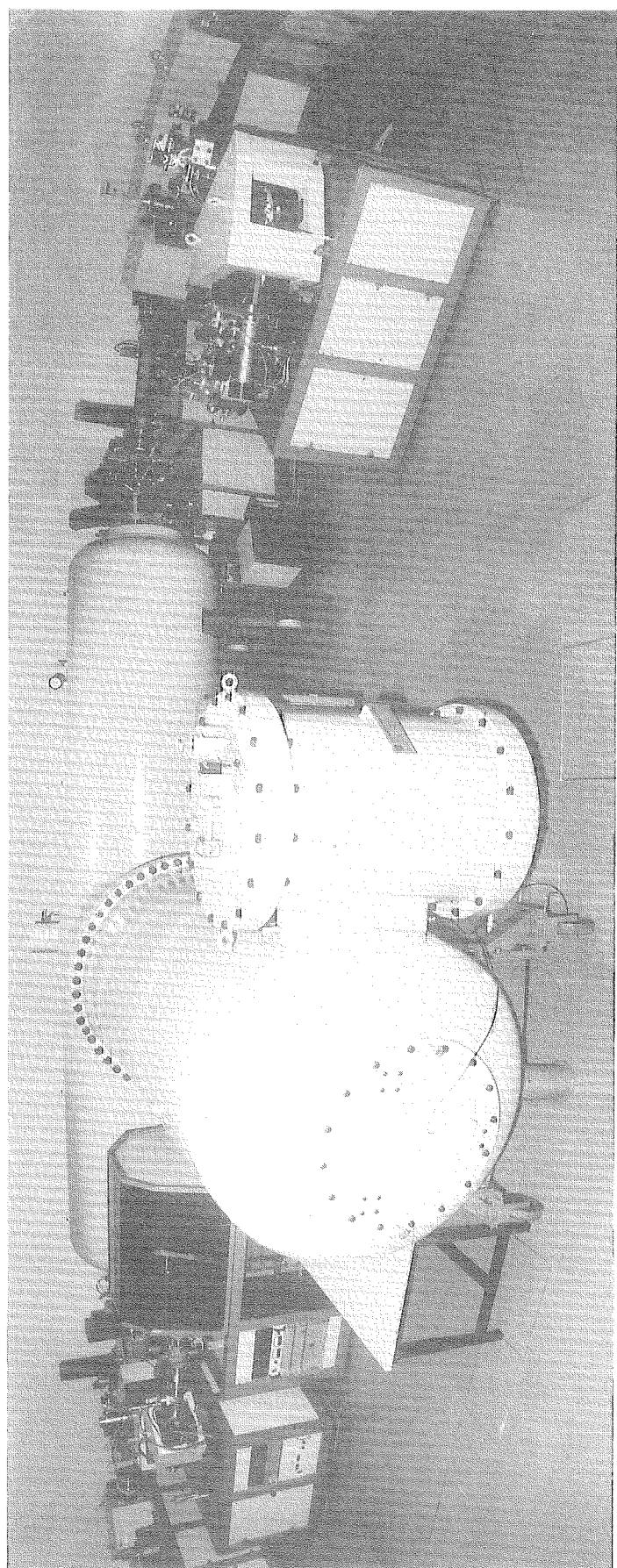


写真1 加速器質量分析装置全体

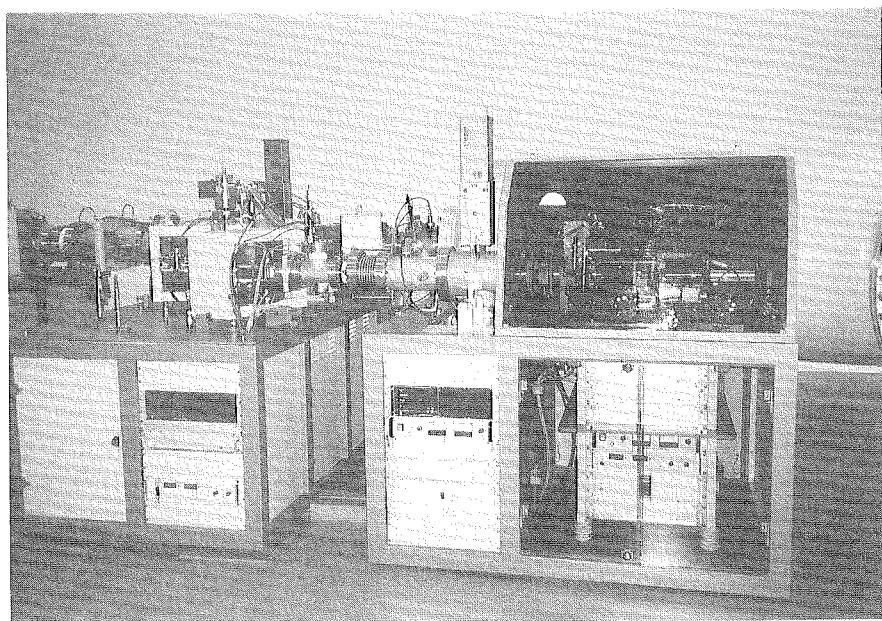


写真2 イオン源

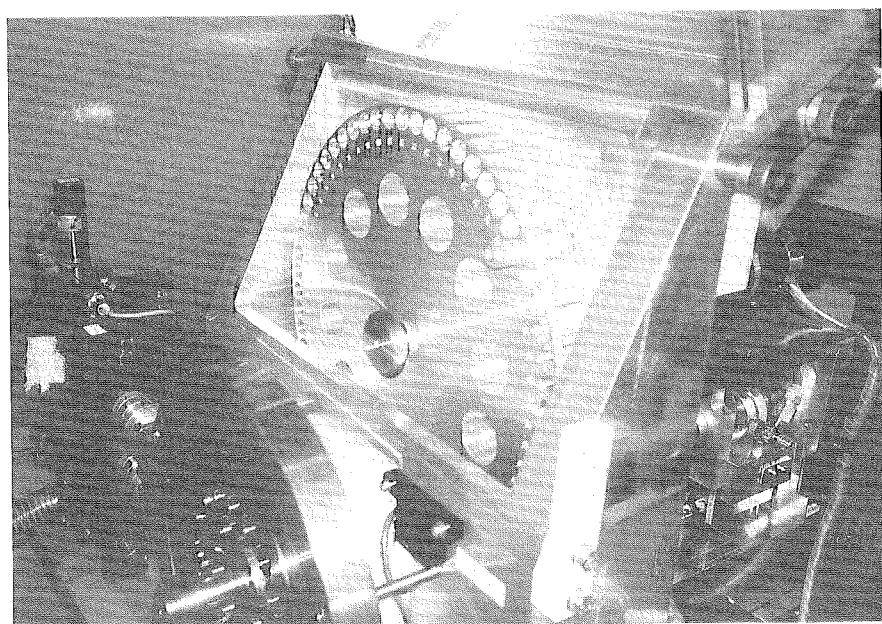


写真3 マルチターゲット部

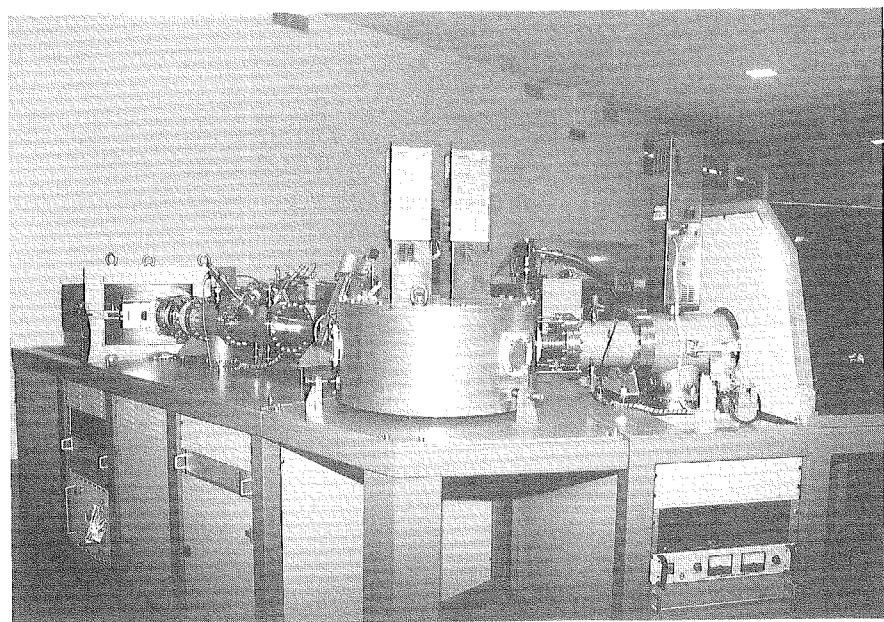


写真4 炭素用イオン入射部

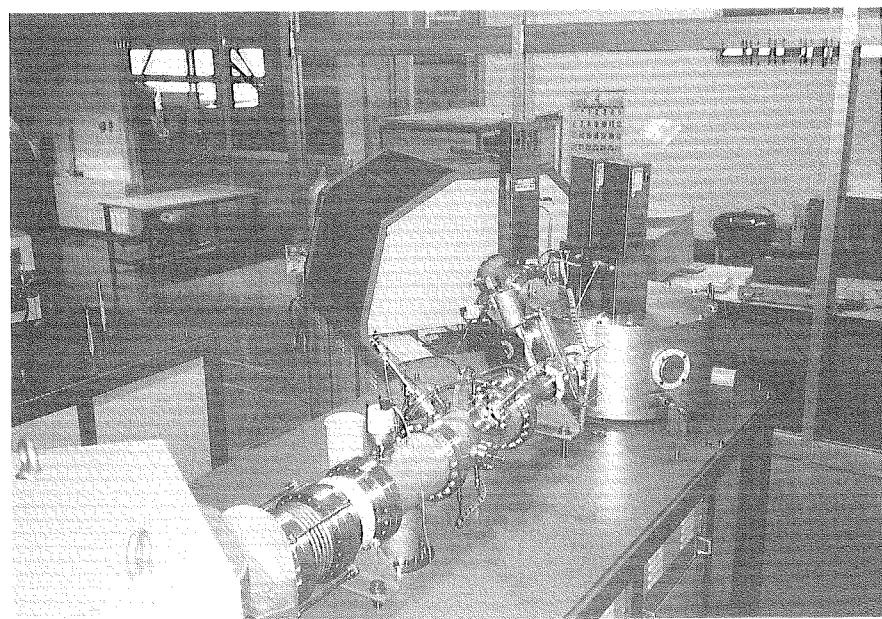


写真5 ヨウ素用イオン入射部

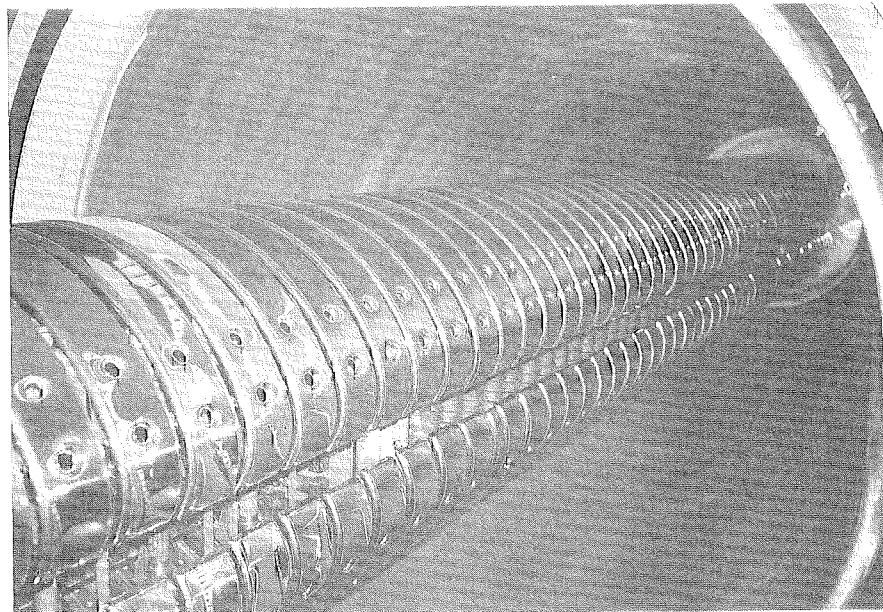


写真6 高電圧発生部

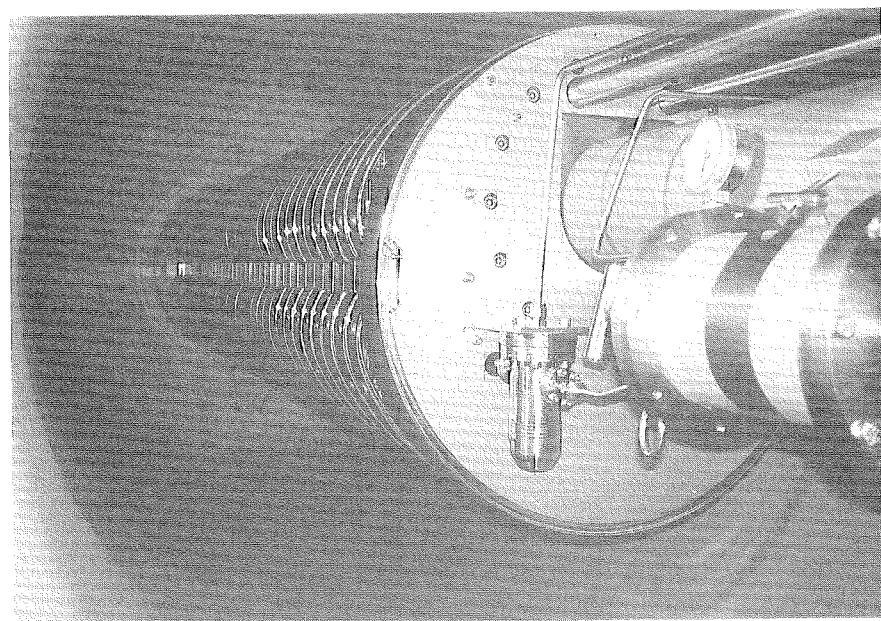


写真7 低エネルギー加速管

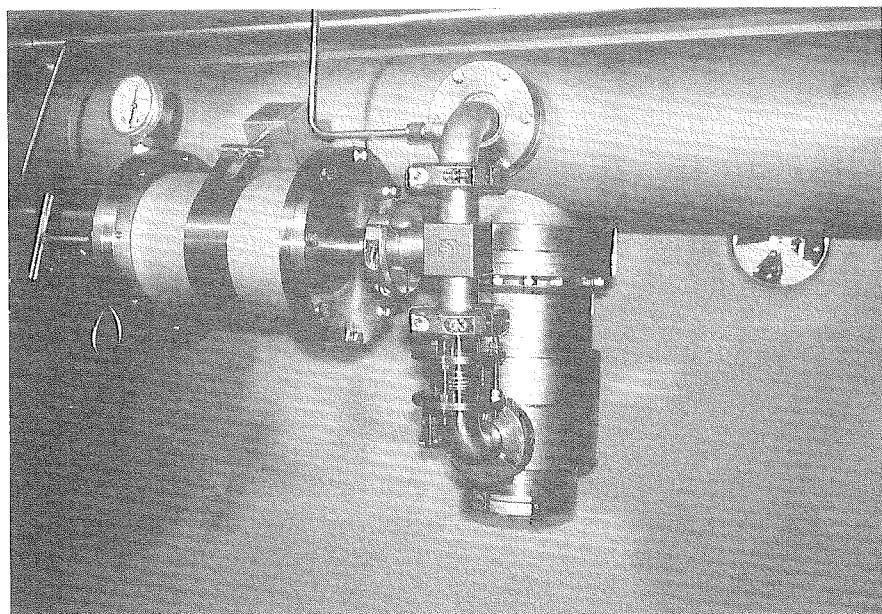


写真8 荷電変換部

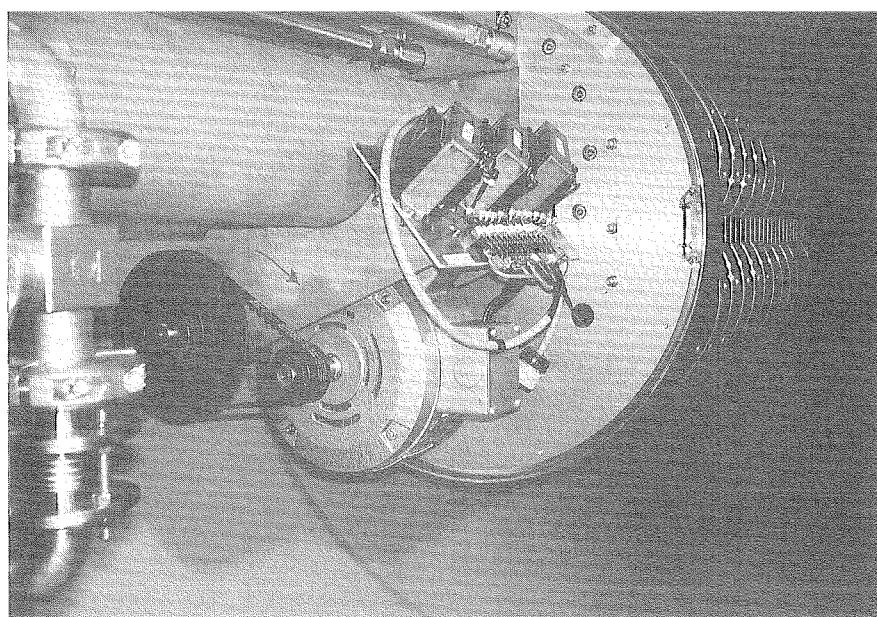


写真9 高エネルギー加速管

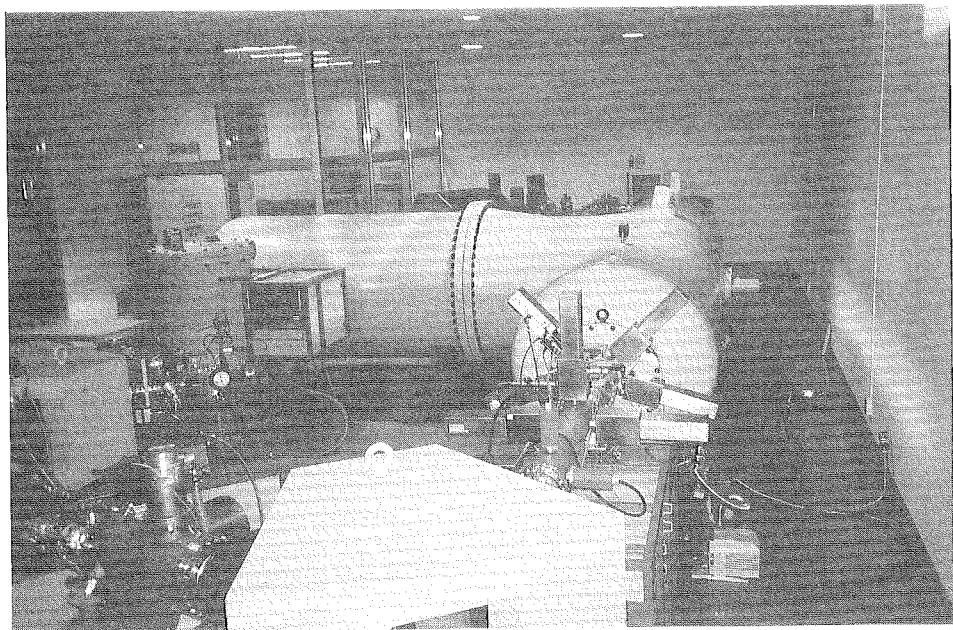


写真 10 炭素用エネルギー質量分析部

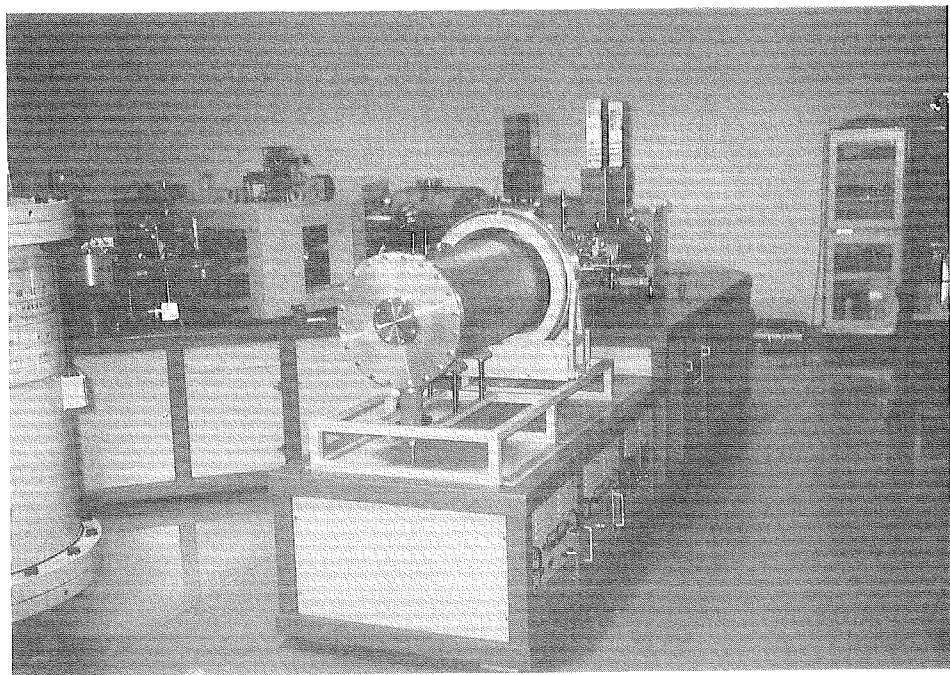


写真 11 ヨウ素用エネルギー質量分析部

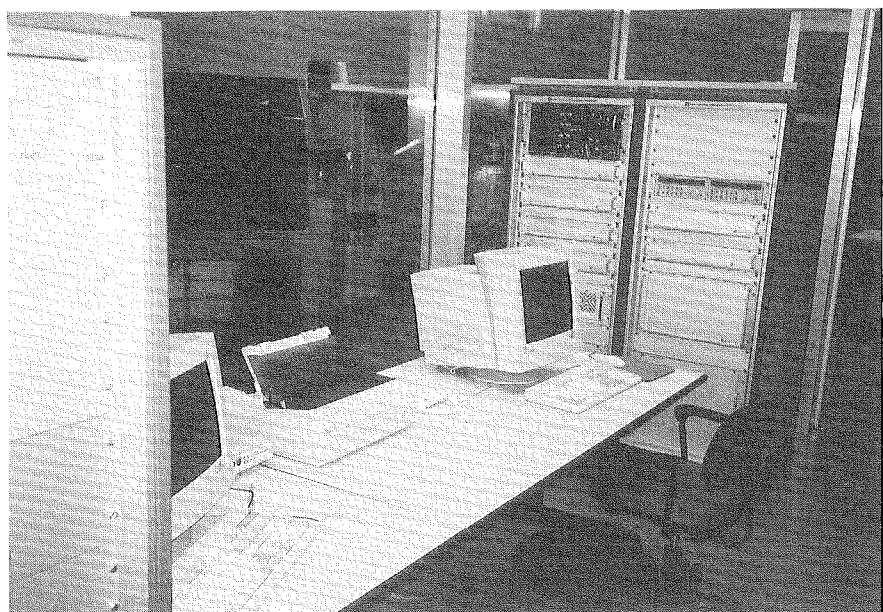


写真 12 コンピュータ

## 4. 測定性能に関する試験

タンデトロンは、前述したように主に炭素の同位体比を測定するラインと質量数の重いヨウ素の同位体比を測定するラインから構成される。現在、炭素ラインの全ての調整が終了してヨウ素ランの重イオン検出器による<sup>129</sup>I測定精度に関する試験が終了した。

### 4. 1 <sup>14</sup>C測定に係わる機器の性能試験

<sup>14</sup>C測定精度に係わる検査を行う前に、測定精度に大きく影響を与えるイオンビームの透過率(transmission)を確認すること及び各機器の安定性を確認することを目的として、ステアラー、マグネット等の機器の電圧、電流等変化させ、110°電磁石後の<sup>12</sup>C、<sup>13</sup>Cの電流値、<sup>12</sup>C/<sup>13</sup>Cの比及び<sup>14</sup>Cカウントを計測した。この試験は、タンデントロンのオペレーションシステムのソフトの中に組み込まれており、analysis scanで<sup>14</sup>C scanを選択することにより行える。analysis scanを行った機器は下記の表3のとおりであり、その結果を、図6～図22に示す。

表3 <sup>14</sup>C Analysis Scan一覧表

No.	機 器 名	ファイル名	備 考
1	RI Source Einzellens	980615A1	図6参照 注)
2	RI Source X-Steerer	980615A2	図7参照 注)
3	RI Source Y-Steerer	980615A3	図8参照 注)
4	RI Extraction Voltage	980428C1	図9参照
5	RI Target Voltage	980428C3	図10参照
6	RI Recombinator Magnets	980529A3	図11参照 注)
7	RI Recombinator Slotlens	980529A8	図12参照
8	RI Recombinator Y1-Steerer	980529A6	図13参照
9	RI Recombinator Y2-Steerer	980531A3	図14参照
10	RI Recombinator X3-Magnet	980529A9	図15参照
11	RI Recombinator X4-Magnet	1021-009	図16参照
12	RI Q-snout Voltage	980504B1	図17参照
13	Stripper Gas Up Scan	980530A3	図18参照
14	Stripper Gas Down Scan	980530A4	図19参照
15	33°Deflector	980601A3	図20参照 <sup>14</sup> C を測定 注)
16	90°Magnet	980504A2	図21参照 <sup>14</sup> C を測定 注)
17	Pan to position	980615B2	図22参照

注) 機器の設定値は、測定の都度行うビーム強度のオプティマイズにより変わる。

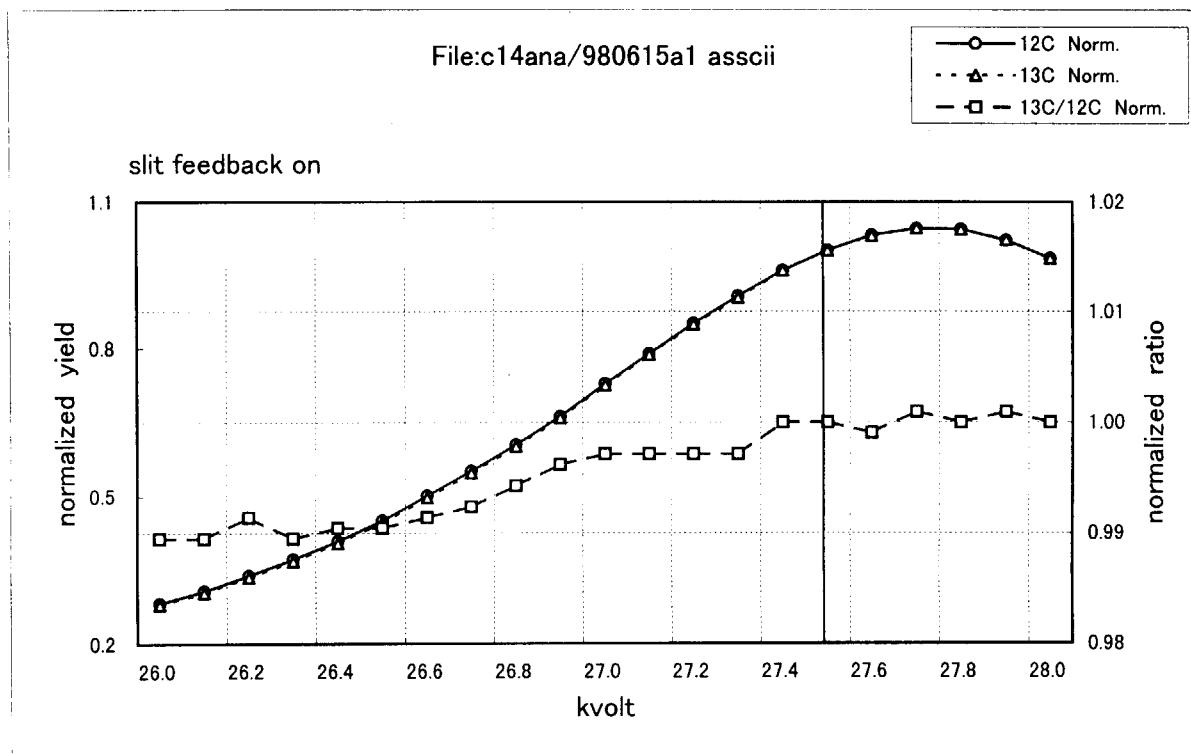


図6 C14: RI Einzel Lens Analysis Scan

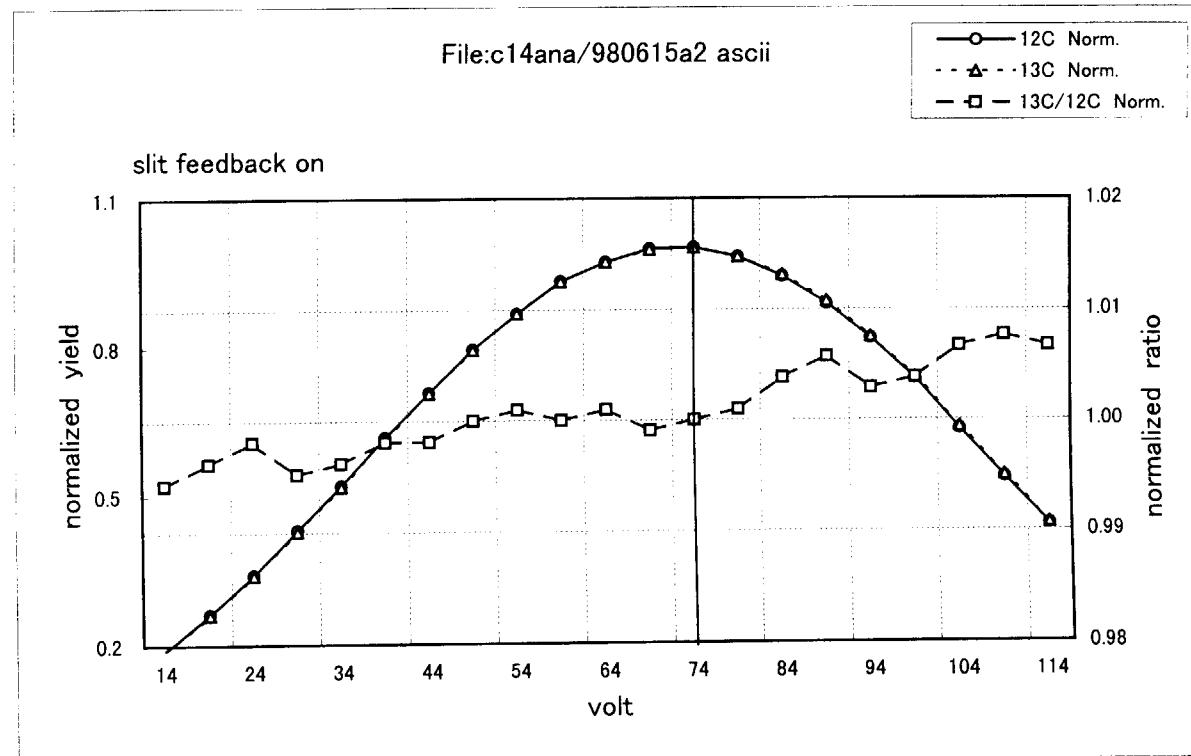


図7 C14: RI Source X-Steerer Analysis Scan

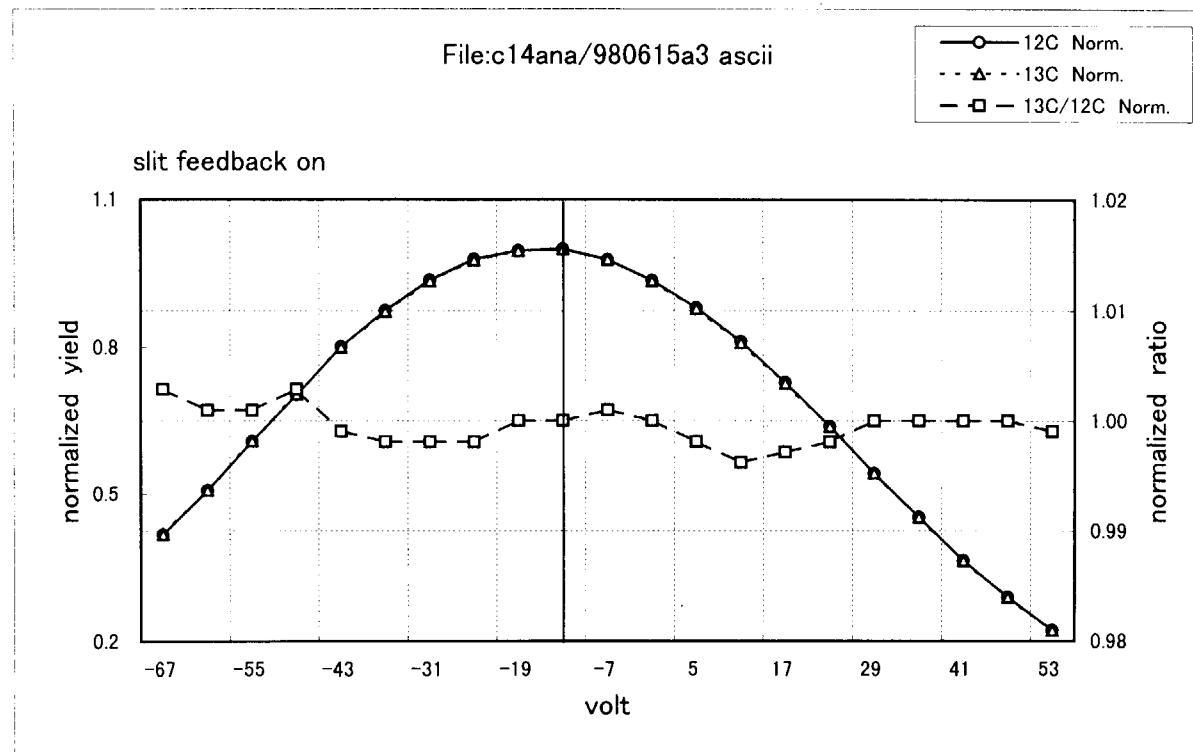


図8 C14: RI Source Y-Steerer Analysis Scan

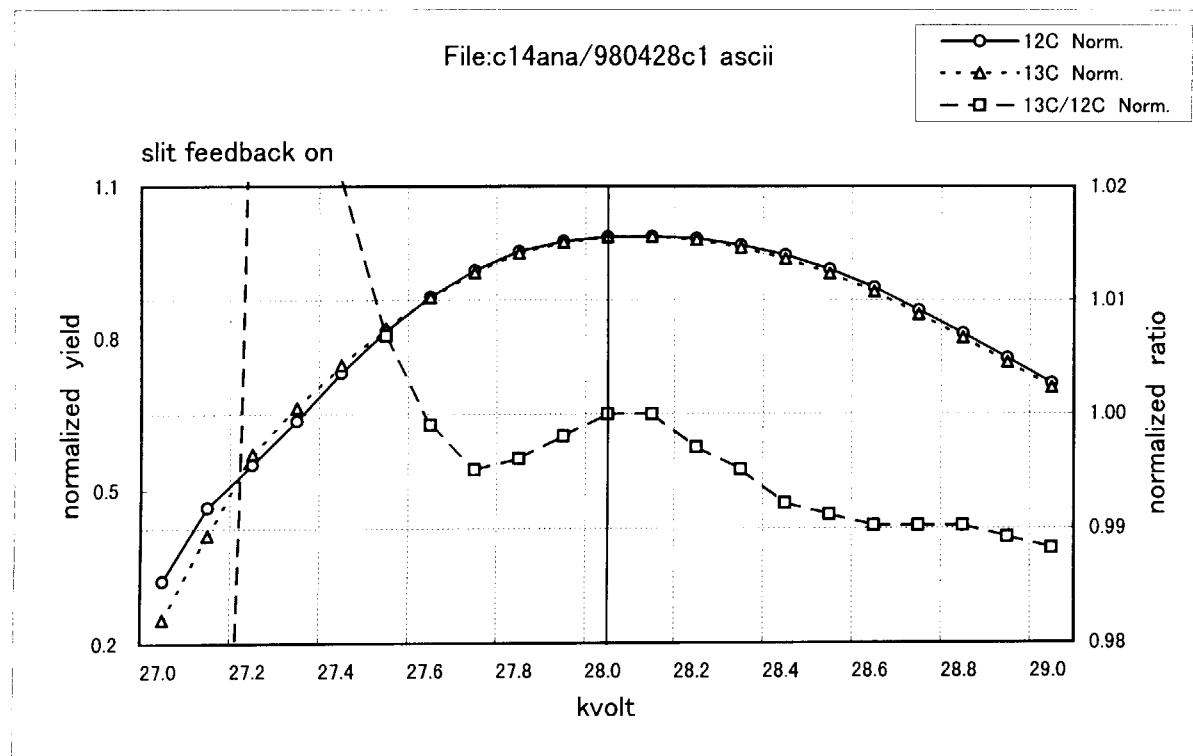


図9 C14: RI Extraction Voltage Analysis Scan

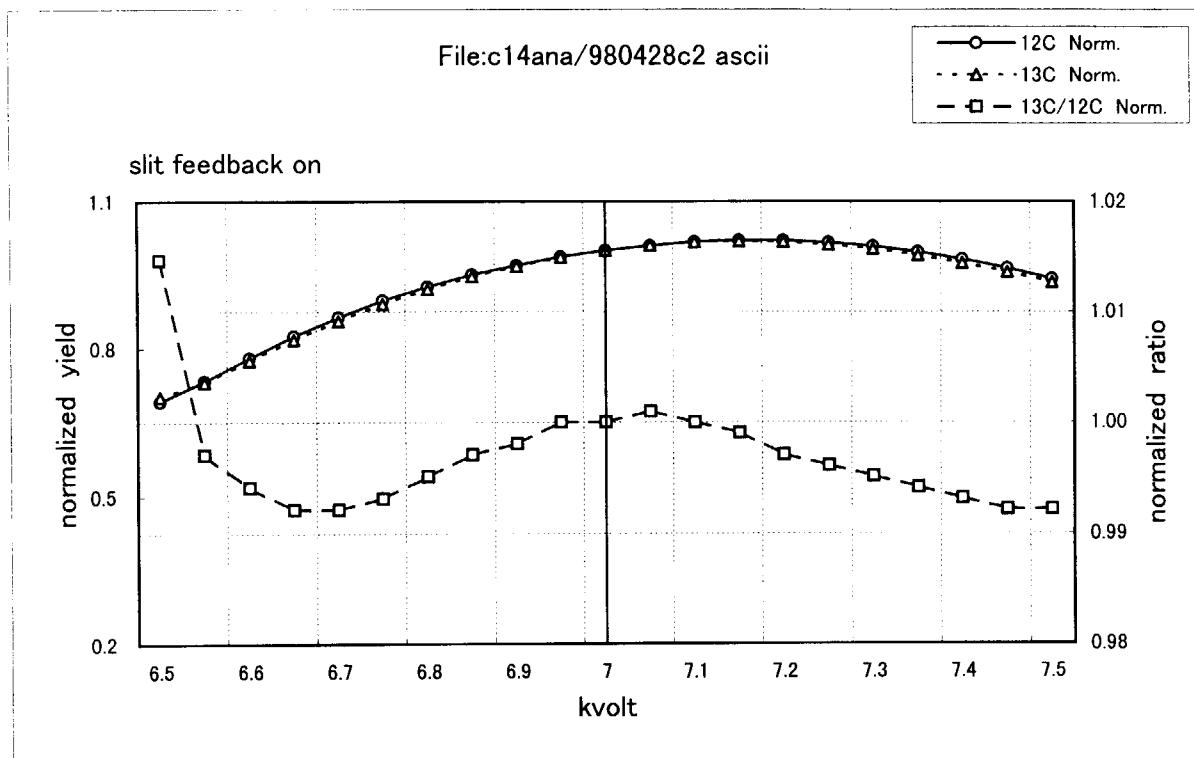


図10 C14: RI Target Voltage Analysis Scan

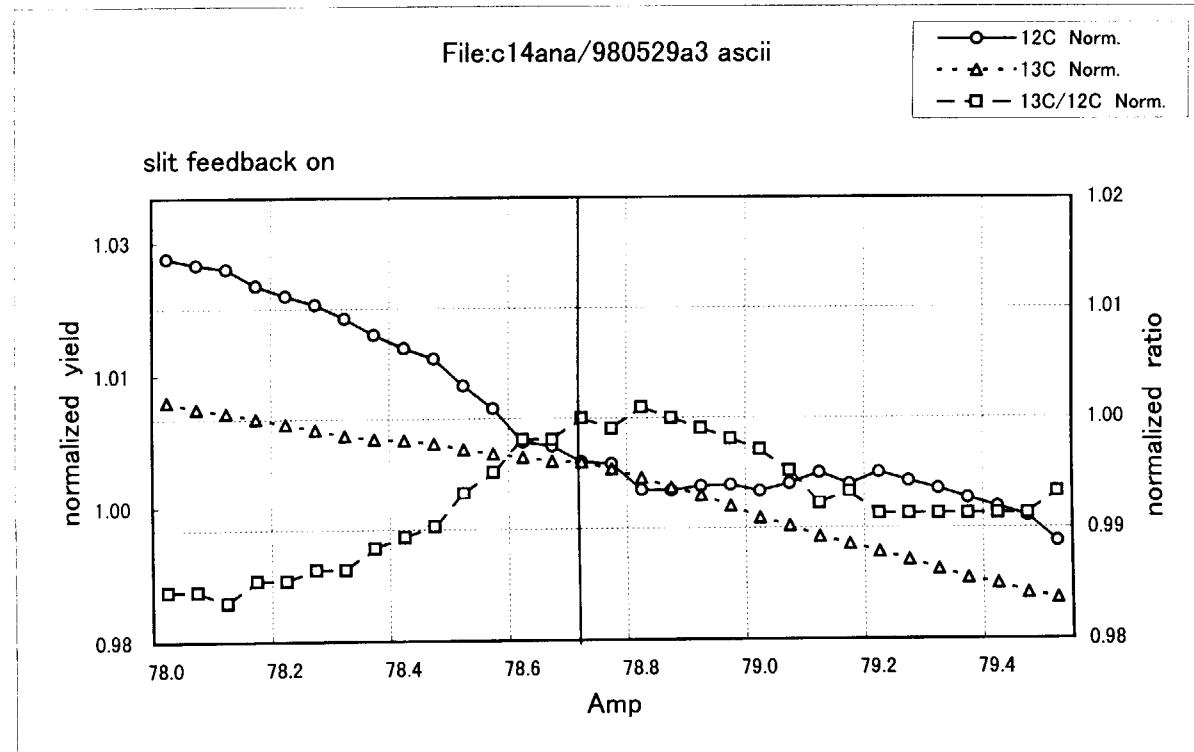


図11 C14: RI Recomb. Magnets Analysis Scan

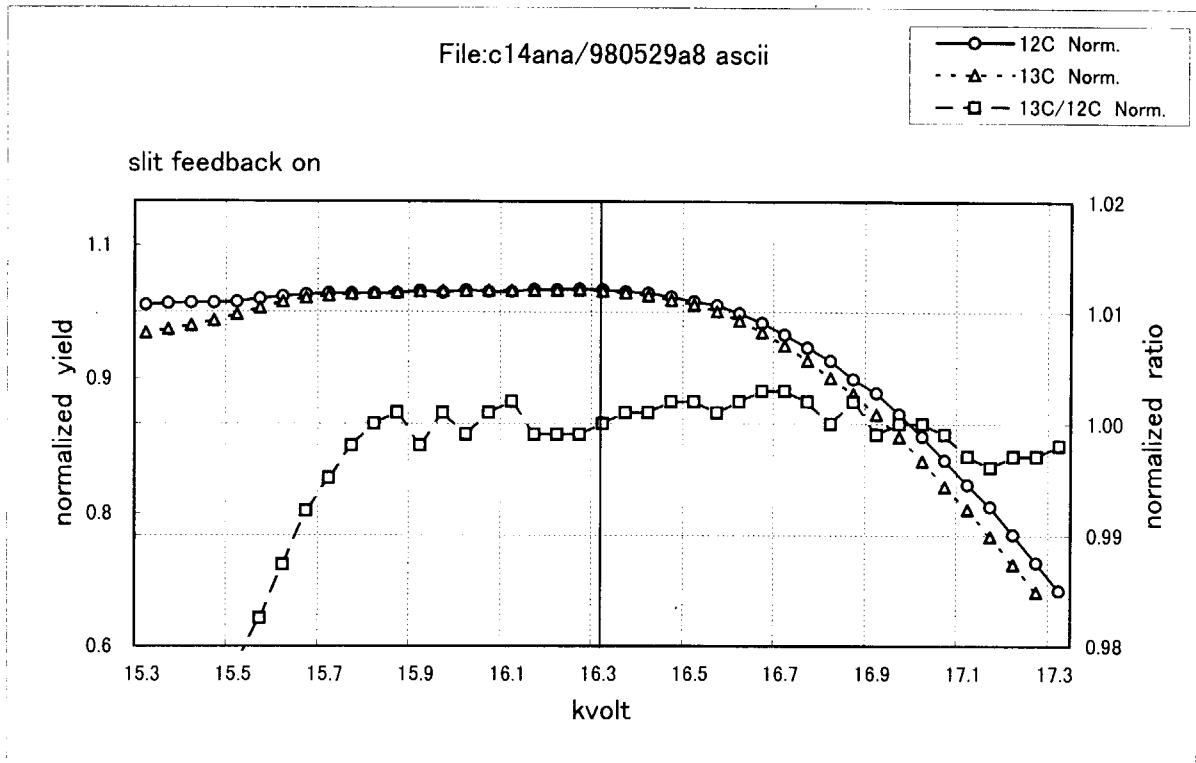


図12 C14: RI Recomb. Slot Lens Analysis Scan

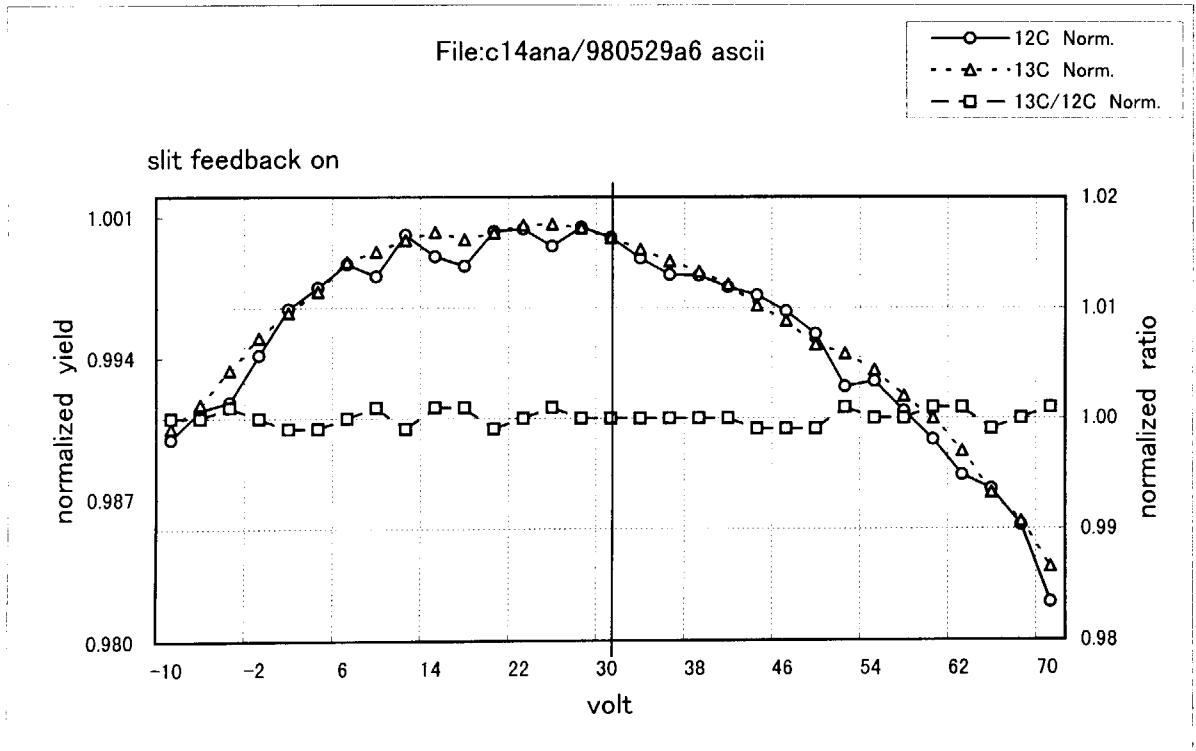


図13 C14: RI Recomb. Y1-Steerer Analysis Scan

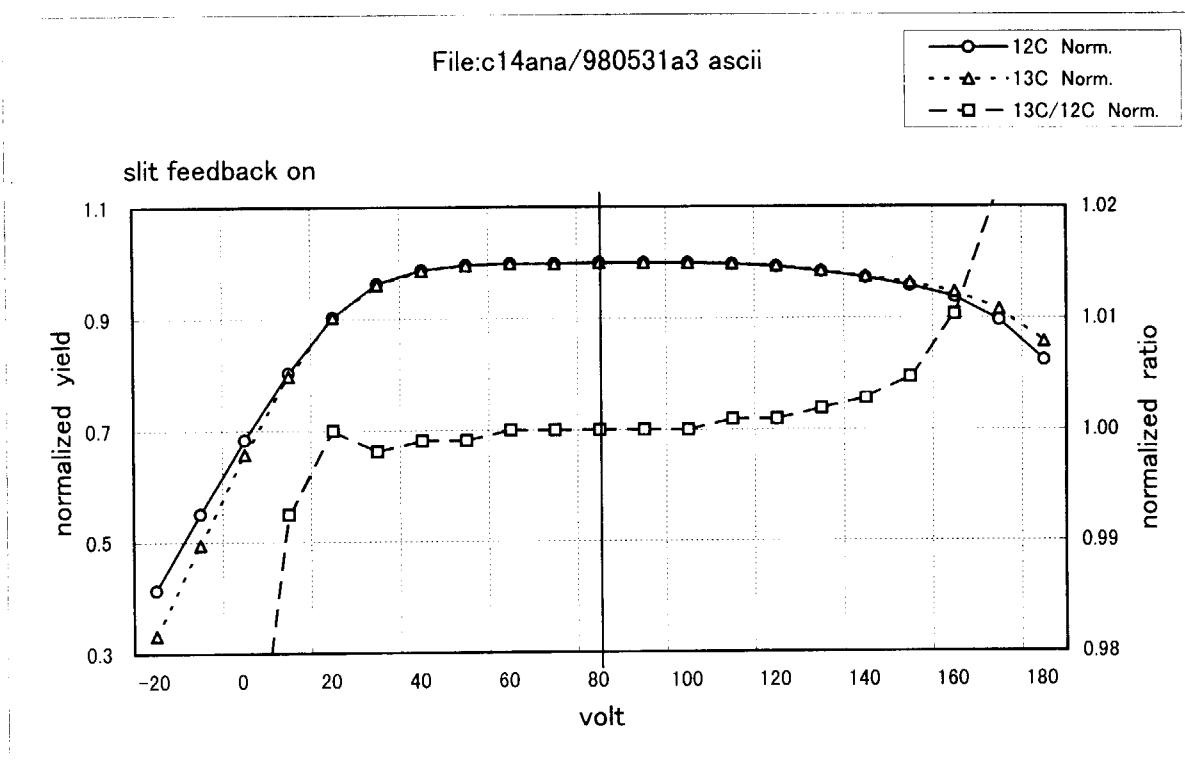


図14 C14: RI Recomb. Y2-Steerer Analysis Scan

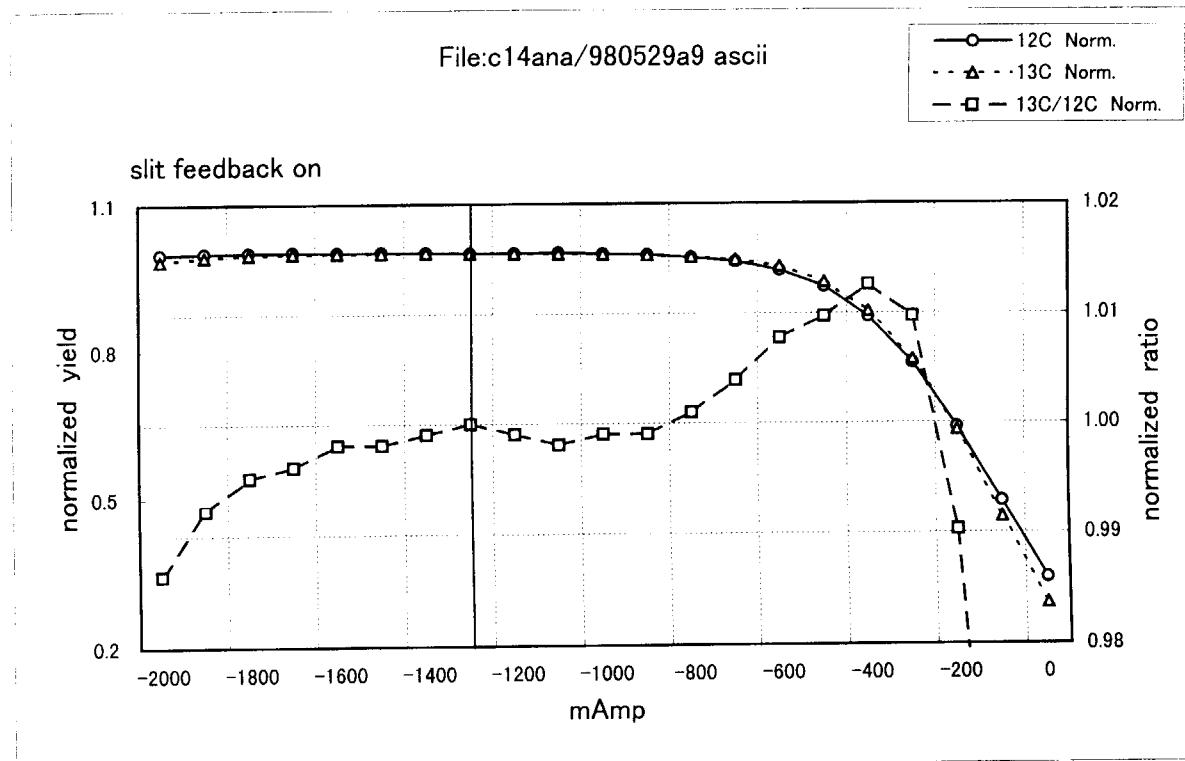


図15 C14: RI Recomb. X3-Magnet Analysis Scan

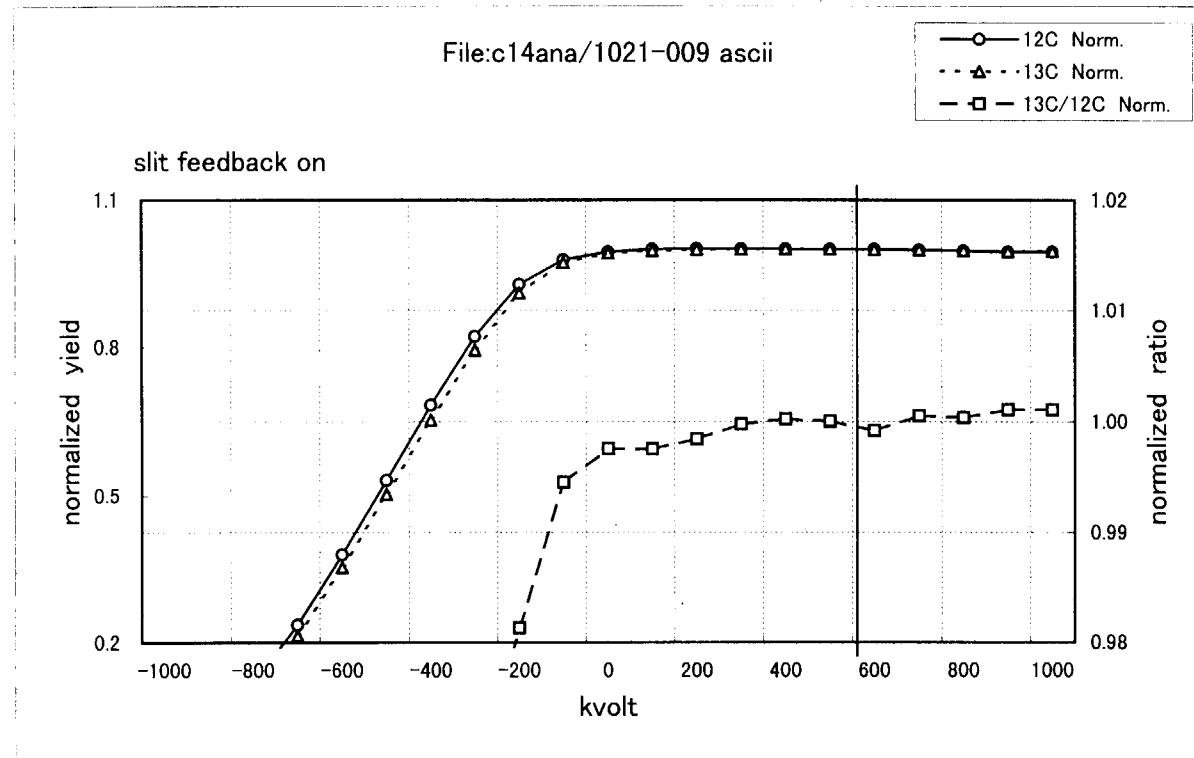


図16 C14: RI Recomb. X4-Magnet Analysis Scan

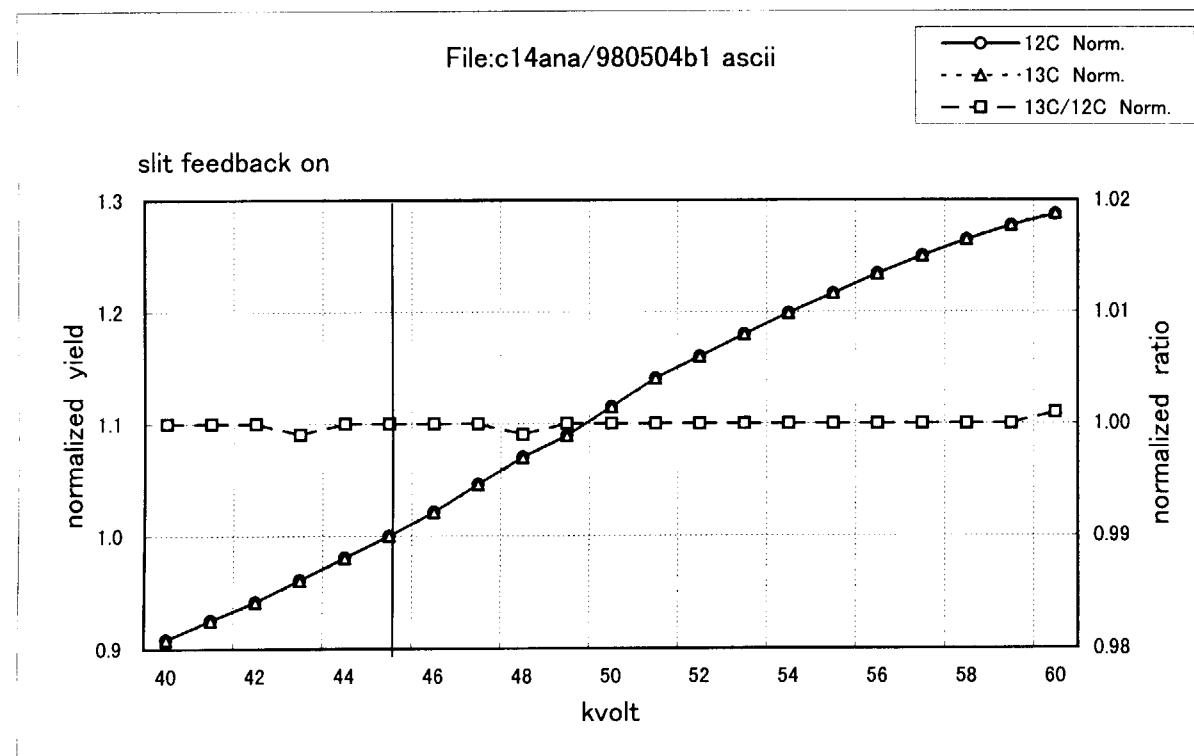


図17 C14: Q-Snout Analysis Scan

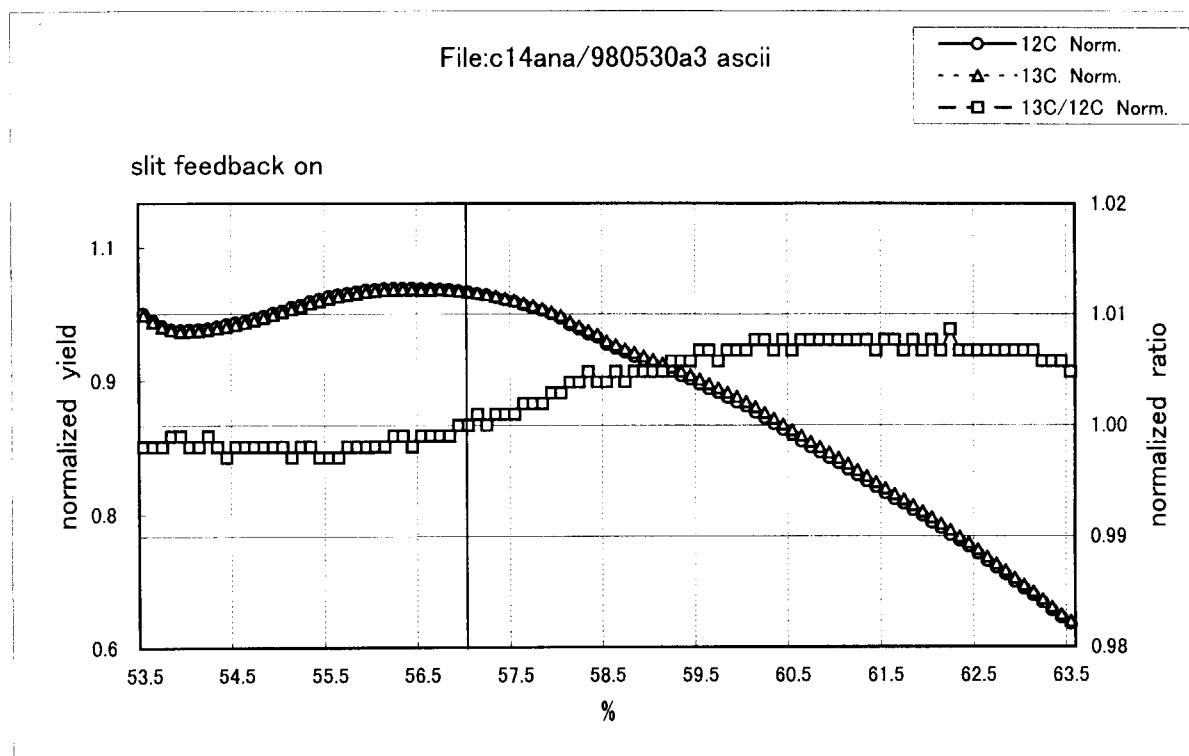


図18 Stripper Gas Up Analysis Scan

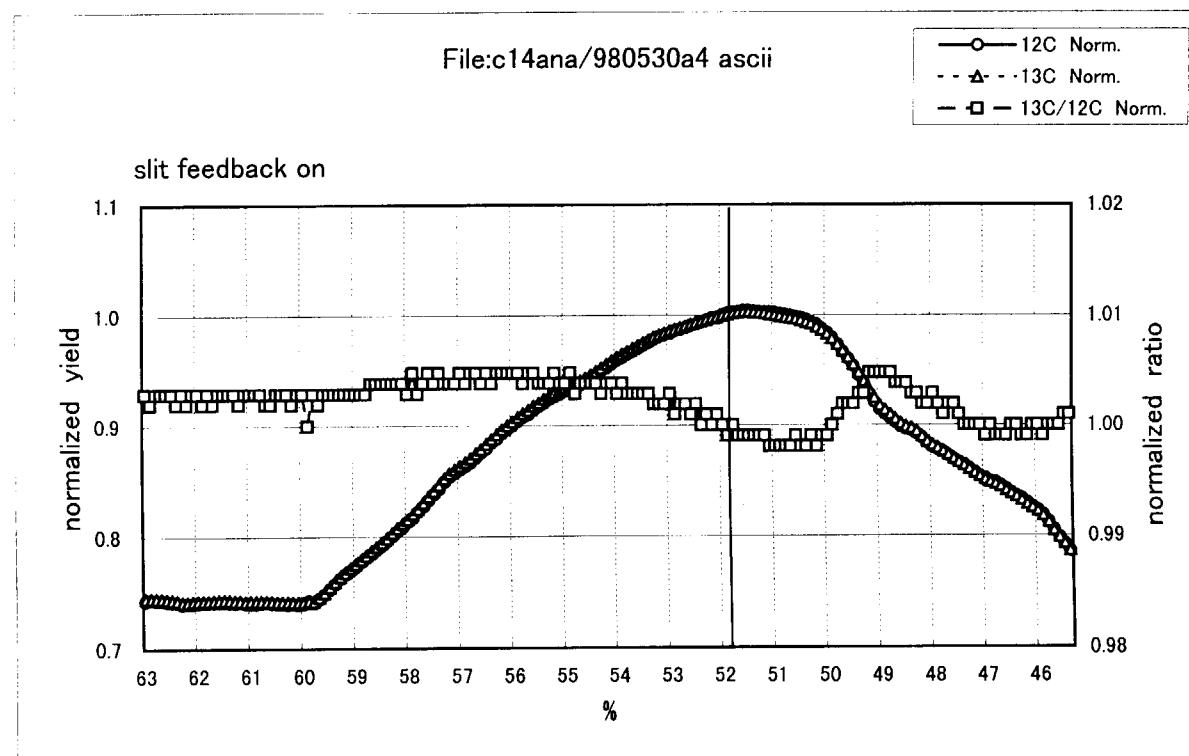


図19 Stripper Gas Down Analysis Scan

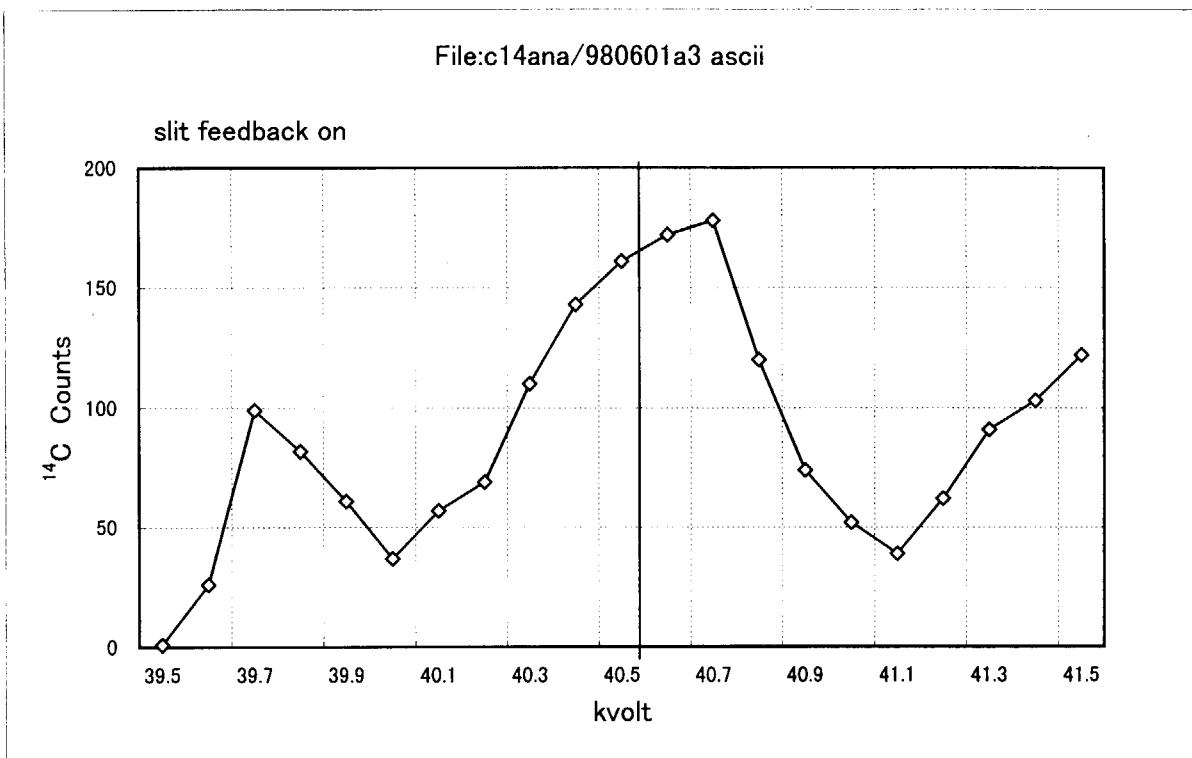


図20 33 Deflector Analysis Scan

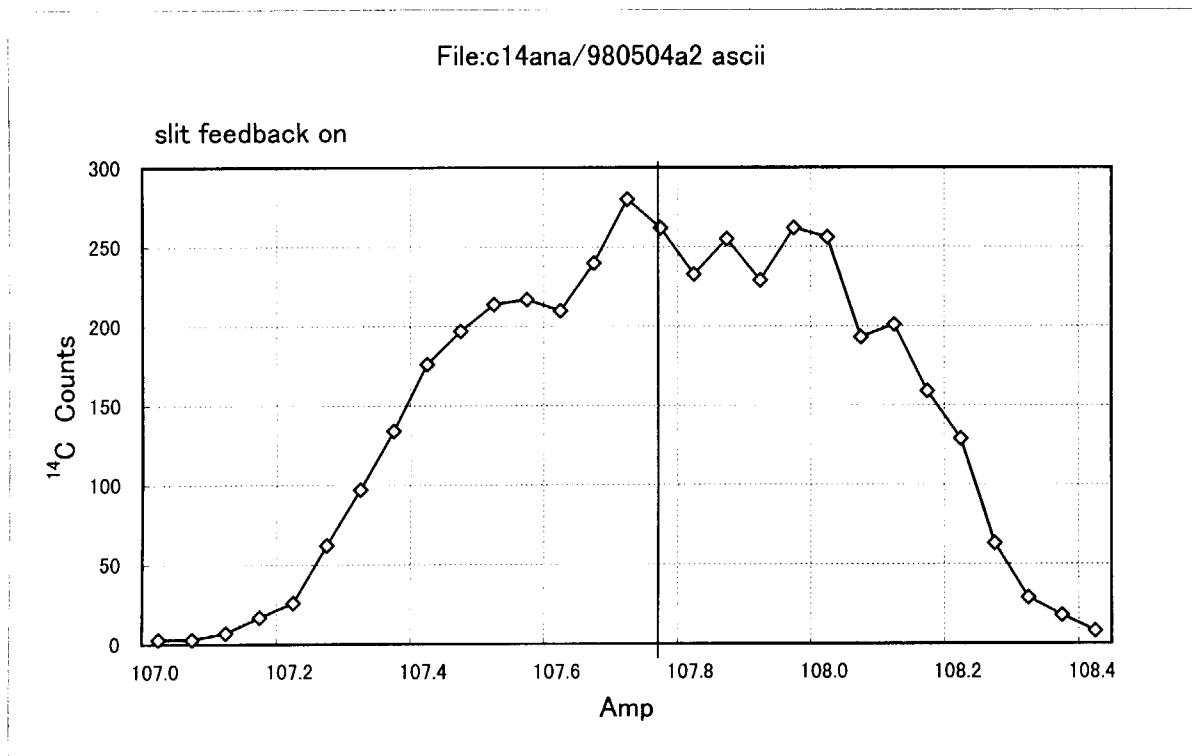


図21 90 Magnet Analysis Scan

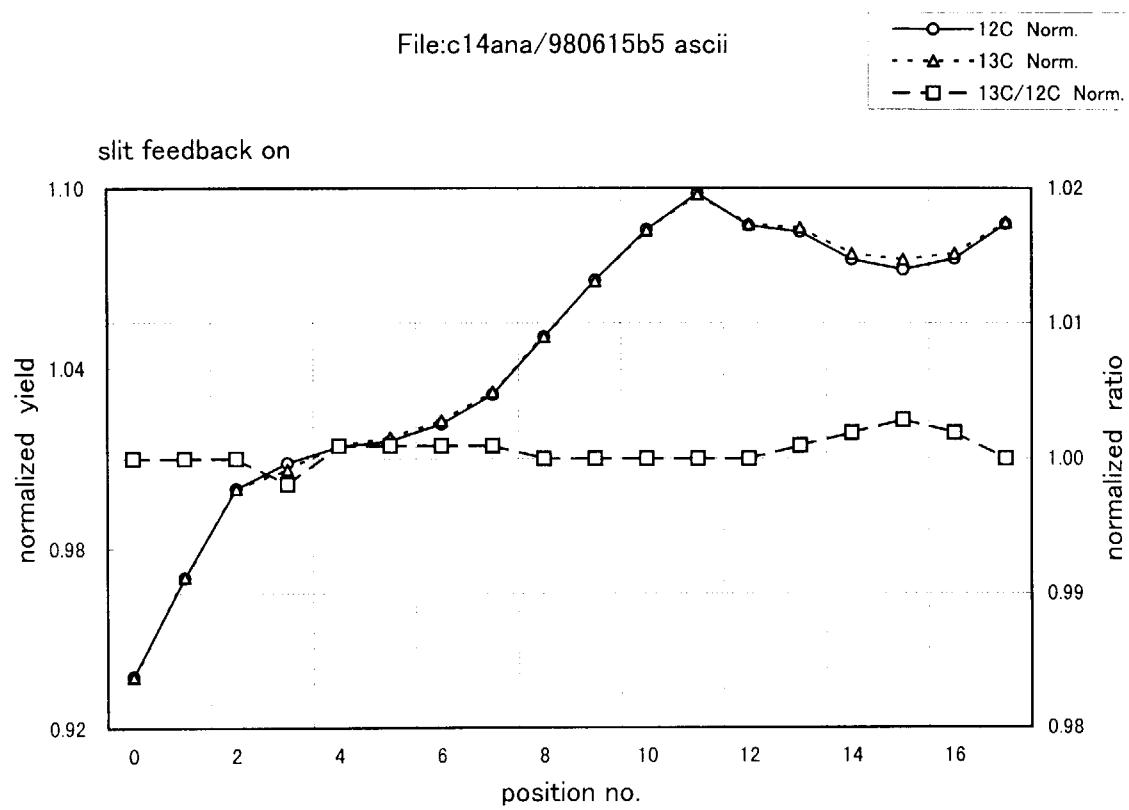


図22 Pan to Position Analysis Scan

#### 4. 2 $^{14}\text{C}$ 測定精度に関する試験

$^{14}\text{C}$ の測定精度に係わる試験は、ドイツのクリスチャン・アルブレヒツ大学で前処理した標準試料 (Oxalic II 138pMC) の 6 試料 (同一なもの) を用いて、1998年 6 月 8 日及び 9 日の両日行った。装置のコンデショニングを行った後、6 試料について順次  $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$  比及び  $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$  比を測定した。1 試料あたり、ターゲット表面のクレーター効果を低減させるため X-Y 方向に 9 ポイント走査させ、これを 2 回繰り返して 1 個のデータとした。なお、1 ポイントは、30 秒間の CS スパッタリングを行い測定した。これをそれぞれの試料に対して、順次繰り返し測定し、統計誤差が  $\pm 0.25\%$  以下になるまで続けた。実際には  $^{14}\text{C}$  の総カウント数が 170,000 カウント前後まで測定を繰り返した。次の日に、再びイオン源を立ち上げ、加速電圧等のコンデショニングを行った後、前日と同様な計測を行い装置の安定性を確認した。第 1 日及び第 2 日の測定結果を表 4 及び表 5 に示す。第 1 日及び第 2 日の  $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$  比の変動係数 (相対標準偏差) は、それぞれ 0.158% 及び 0.389% で良い結果が得られた。この両日のタンデトロンの運転状態を表 6 に示す。

表4 Results of the first day ( Jun 8,1998 )

sample #	$^{12}\text{C}$ curr. (nA)	$^{13}\text{C}$ curr. (nA)	$^{14}\text{C}$ (counts)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ( $\times 10^{-2}$ )	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ( $\times 10^{-12}$ )
1	159.10	169.24	173542	1.09667	1.42440
2	162.94	173.26	178163	1.09623	1.42770
3	163.64	173.94	178703	1.09588	1.42549
4	165.91	176.42	181426	1.09629	1.42799
5	169.24	180.01	184323	1.09655	1.42198
6	169.08	179.78	184744	1.09621	1.42644
statistical error		0.236%			
mean		180150	1.09631	1.42567	
standard deviation			0.00028	0.00225	
rel. Standard deviation			0.025%	0.158%	

$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
Run2	1.41425	1.42221	1.40236	1.42832	1.42523	1.41406
Run3	1.43073	1.41683	1.42937	1.43231	1.40859	1.43149
Run4	1.42802	1.42251	1.40240	1.41938	1.42572	1.43020
Run5	1.42595	1.44057	1.44556	1.43819	1.42282	1.42632
Run6	1.43830	1.42936	1.43077	1.43520	1.42510	1.42119
Run7	1.42276	1.42674	1.43225	1.42282	1.42647	1.42963
Run8	1.41082	1.43571	1.43575	1.41973	1.41995	1.43220
Standard Deviation	0.00948	0.00825	0.01666	0.00757	0.00631	0.00663
Average	1.424404	1.427704	1.425494	1.427993	1.421983	1.426441
Rel. Standard Deviation	0.665%	0.578%	1.169%	0.530%	0.443%	0.465%
Final Standard Deviation	0.00225					
Final Average	1.425670					
Final Rel. Standard Deviation	0.1580%					

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
Run2	1.09760	1.09711	1.09691	1.09723	1.09744	1.09719
Run3	1.09702	1.09654	1.09623	1.09674	1.09727	1.09693
Run4	1.09696	1.09629	1.09611	1.09638	1.09654	1.09625
Run5	1.09667	1.09623	1.09573	1.09610	1.09658	1.09616
Run6	1.09639	1.09616	1.09552	1.09611	1.09632	1.09579
Run7	1.09598	1.09579	1.09549	1.09599	1.09608	1.09578
Run8	1.09605	1.09548	1.09515	1.09551	1.09563	1.09536
Standard Deviation	0.00058	0.00052	0.00059	0.00056	0.00064	0.00065
Average	1.096667	1.096229	1.095877	1.096294	1.096551	1.096209
Rel. Standard Deviation	0.053%	0.048%	0.054%	0.051%	0.058%	0.060%
Final Standard Deviation	0.000279					
Final Average	1.096305					
Final Rel. Standard Deviation	0.0255%					

表5 Results of the second day ( Jun 9,1998 )

sample #	$^{12}\text{C}$ curr. (nA)	$^{13}\text{C}$ curr. (nA)	$^{14}\text{C}$ (counts)	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ( $\times 10^{-2}$ )	$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ ( $\times 10^{-12}$ )
1	206.23	219.38	162459	1.09669	1.44032
2	234.64	250.00	183210	1.09842	1.42736
3	233.91	249.12	182780	1.09800	1.42847
4	226.40	241.11	177624	1.09788	1.43438
5	229.21	243.91	180175	1.09706	1.43721
6	212.46	226.10	167325	1.09713	1.43973
<hr/>					
statistical error			0.239%		
average			175596	1.09753	1.43458
standard deviation				0.00067	0.00558
rel. Standard deviation				0.061%	0.389%

$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
Run1	1.43984	1.41874	1.43766	1.43254	1.44202	1.44118
Run2	1.43242	1.44232	1.41417	1.42514	1.42372	1.42975
Run3	1.44734	1.42830	1.44114	1.43090	1.44183	1.44136
Run4	1.43660	1.43183	1.42826	1.43886	1.44661	1.44872
Run5	1.44542	1.41563	1.42114	1.44445	1.43185	1.43764
<hr/>						
Standard Deviation	0.00616	0.01068	0.01122	0.00746	0.00927	0.00688
Average	1.440324	1.427364	1.428474	1.434378	1.437206	1.439730
Rel. Standard Deviation	0.428%	0.748%	0.785%	0.520%	0.645%	0.478%
Final Standard Deviation	0.00558					
Final Average	1.434579					
Final Rel. Standard Deviation	0.3891%					

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	Sample1	Sample2	Sample3	Sample4	Sample5	Sample6
Run1	1.09740	1.09897	1.09829	1.09734	1.09703	1.09699
Run2	1.09675	1.09764	1.09753	1.09849	1.09635	1.09570
Run3	1.09652	1.09807	1.09850	1.09727	1.09645	1.09729
Run4	1.09665	1.09973	1.09811	1.09813	1.09793	1.09835
Run5	1.09613	1.09771	1.09756	1.09818	1.09756	1.09734
<hr/>						
Standard Deviation	0.00046	0.00090	0.00044	0.00055	0.00069	0.00095
Average	1.096690	1.098424	1.097998	1.097882	1.097064	1.097134
Rel. Standard Deviation	0.042%	0.082%	0.040%	0.050%	0.063%	0.087%
Final Standard Deviation	0.000667					
Final Average	1.097532					
Final Rel. Standard Deviation	0.0607%					

表6 タンデトロンの運転状態 ( $^{14}\text{C}$ 測定)

	項目	6月8日	6月9日	備考
イ オ ン 源 部	Taget Voltage	7KV	7KV	
	Extraction Voltage	28KV	28KV	
	Cs Temp	143Degrees	145Degrees	(注)
	Ionizer Current	18A	18A	
	Einzel Lens	27.08KV	27.37KV	(注)
	X Steerer	-22V	-25V	(注)
	Y Steerer	71V	70.5V	(注)
入 射 部	Slot lens	16.3KV	16.3KV	
	Y Steerer1	30V	30V	
	Y Steerer2	80V	80V	
	Magnets	78.71A	78.71A	(注)
	Magnet3	-1300mA	-1300mA	
	Magnet4	550mA	550mA	
加 速 部	Terminal Voltage	2500KV	2500KV	
	Q-Snout	45KV	45KV	
	Stripper Gas	56.3%	56.3%	(注)
	Q-Pole Focus	66%	66%	
	Q-Pole Astigmatism	-2.2%	-2.2%	
質 量 分 析 部	110 degree magnet	108.34A	108.33A	(注)
	33 degree Deflector	40.55KV	40.55KV	
	90 degree magnet	107.7A	107.9A	(注)
	X1 Steerer	2450V	2450V	
	X2 Steerer	1550V	1550V	
	Y1 Steerer	-500V	-500V	
	Y2 Steerer	-3500V	-3500V	
真 空 度	HV1 Vacuum	7.6E-07mBar	5.8E-07mBar	
	HV2 Vacuum	7.2E-07mBar	6.1E-07mBar	
	HV3 Vacuum	1.2E-06mBar	1.3E-06mBar	
	HV4 Vacuum	8.1E-07mBar	8.9E-07mBar	
	HV5 Vacuum	5.7E-08mBar	5.9E-08mBar	
加 速 管	LE column Current	373 $\mu\text{A}$	372 $\mu\text{A}$	
	HE column Current	65 $\mu\text{A}$	65 $\mu\text{A}$	
	Upcharge Current	129 $\mu\text{A}$	129 $\mu\text{A}$	

注) 機器の設定値は、測定の都度行うビーム強度のオプティマイズにより変わる。

#### 4. 3 $^{129}\text{I}$ 測定に係わる機器の性能試験

$^{129}\text{I}$  の測定精度に係わる検査を行う前に、 $\text{N}_i$  及び  $\text{I}$  試料を用いてイオンビームの透過率 (Transmission) 及び各機器の安定性を確認することを目的として、Analysis scan 及び Mapping を行った。 $\text{N}_i$  試料を用いた確認では、 $^{60}\text{Ni}$  のイオンビームを重イオン検出器前のファラデーカップで電流計測し、 $^{58}\text{Ni}$  のイオンビームを高エネルギー質量分析部のピックアップ・ファラデーカップで電流計測した。 $\text{N}_i$  試料による透過率及び安定性を確認した後、4 個の $\text{N}_i$  試料を用いて簡易的な精度確認を行った。各 $\text{N}_i$  試料の run 每に対する  $^{60}\text{Ni} / ^{58}\text{Ni}$  比の変動係数（相対標準偏差）が 0.237% 以下と非常に安定した値が得られた。その結果を表 7 に示す。

次に、 $\text{I}$  試料を用いて Analysis scan 及び Mapping を行った。 $\text{I}$  試料を用いた確認では、 $^{129}\text{I}$  のイオンを重イオン検出器でパルスとしてカウントし、 $^{127}\text{I}$  のイオンビームを高エネルギー質量分析部のピックアップ・ファラデーカップで電流計測した。計測前に、 $^{127}\text{I}$  のイオンビームがこのファラデーカップのセンターに入射するようにファラデーカップを移動した。

$\text{N}_i$  試料は、 $^{58}\text{Ni}$  及び  $^{60}\text{Ni}$  の存在比がそれぞれ 67.76 %、21.16 % でイオンビームをファラデーカップで電流計測でき、短い時間で透過率及び安定性を確認できる。さらに、 $\text{N}_i$  試料で得られたマグネット以外の最適値が  $\text{I}$  試料の測定に利用できるため、 $\text{I}$  試料による透過率及び安定性を確認する前に、 $\text{N}_i$  試料を用いて各機器の最適値を見つけ出した。 $\text{N}_i$  試料の測定時には、加速電圧を 2250 kV とし加速後の正 3 倍の  $\text{N}_i$  イオンを測定した。 $\text{N}_i$  及び  $\text{I}$  試料の測定時のタンデトロンの運転状態を表 8 に示す。Analysis scan 及び Mapping を行った機器は表 9 のとおりであり、その測定結果を図 23～図 48 に示す。

表7 Result of Nickel test

ref	sample	inner fc(Ni58)	det. fc(Ni60)	Ni60/Ni58 ratio
no.	no.	nA(DC)	nA(DC)	
run1	59	604.0802	224.9631	0.37241
	5	625.0731	231.6994	0.37068
	16	474.1491	177.1211	0.37356
	17	440.4583	162.6799	0.36934
run2	59	512.8105	190.6575	0.37179
	5	519.0945	192.0502	0.36997
	16	423.2027	158.6233	0.37482
	17	403.3176	148.6139	0.36848
run3	59	490.1681	182.2185	0.37175
	5	532.2564	196.2226	0.36866
	16	420.3997	157.4962	0.37463
	17	360.6306	133.0782	0.36902
run4	59	530.0258	196.9182	0.37153
	5	564.4089	208.9982	0.37030
	16	417.3333	156.1550	0.37417
	17	365.3417	134.8362	0.36907
	average	480.1719	178.2707	0.3713
	rel.std.	16.755%	16.746%	0.584%

sample	run1	run2	run3	run4	average	rel.std.
59	0.37241	0.37179	0.37175	0.37153	0.37187	0.102%
5	0.37068	0.36997	0.36866	0.37030	0.36990	0.237%
16	0.37356	0.37482	0.37463	0.37417	0.37429	0.150%
17	0.36934	0.36848	0.36902	0.36907	0.36898	0.098%
average	0.37149	0.37126	0.37101	0.37127	0.37126	0.053%
rel.std.	0.501%	0.735%	0.749%	0.588%	0.634%	

表8 タンデロンの運転状態( $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{127}\text{I}$ 測定)

		Nickel(10/8)	Iodine(10/12)	Iodine(10/13)
Ion Source (イオン源部)	BI Ionizer Current	18.00 (A)	18.00 (A)	18.00 (A)
	BI Cesium Reservoir Temp	68.00 (°C)	66.00 (°C)	68.00 (°C)
	BI Target Voltage	7.00 (kV)	7.00 (kV)	7.00 (kV)
	BI Extraction Voltage	28.00 (kV)	28.00 (kV)	28.00 (kV)
	BI Source Einzel Lens	22.90 (kV)	22.90 (kV)	22.90 (kV)
	BI ESA Y-Steerer	-120.00 (V)	-120.00 (V)	-120.00 (V)
Bouncer (入射部)	BI ESA	7745.00 (V)	7750.00 (V)	7750.00 (V)
	BI Bouncer Y-Steerer	-30.00 (V)	-30.00 (V)	-30.00 (V)
	BI Magnet	117.30 (A)	177.04 (A)	176.86 (A)
	BI Blanking X-Steerer	-250.00 (V)	-250.00 (V)	-250.00 (V)
	BI Blanking Y-Steerer	-100.00 (V)	-75.00 (V)	-75.00 (V)
	BI Blanking Voltage	600.00 (V)	600.00 (V)	600.00 (V)
	BI Magnet Y-Steerer	200.00 (mA)	0.00 (mA)	0.00 (mA)
	BI Bouncer Einzel Lens	18.60 (kV)	18.50 (kV)	18.50 (kV)
	Recomb Magnets	2.80 (A)	3.25 (A)	3.25 (A)
Accelerator (加速管部)	Recomb Steerer	1000.00 (mA)	1000.00 (mA)	1000.00 (mA)
	Q-Snout	40.00 (kV)	40.00 (kV)	40.00 (kV)
	Terminal Voltage	2250.00 (kV)	2500.00 (kV)	2500.00 (kV)
	Stripper Gas	49.00 (%)	49.00 (%)	48.00 (%)
	Q-Pole Focus	68.00 (%)	68.00 (%)	68.00 (%)
	Q-Pole Astigmatism	-0.80 (%)	-0.80 (%)	-0.80 (%)
	LE Column Current	312 $\mu\text{A}$	312 $\mu\text{A}$	312 $\mu\text{A}$
	HE Column Current	59 $\mu\text{A}$	65 $\mu\text{A}$	65 $\mu\text{A}$
Hevey Element (分析部)	Upcharge Current	116 $\mu\text{A}$	128 $\mu\text{A}$	128 $\mu\text{A}$
	HE X-Steerer 1	1900.00 (V)	1900.00 (V)	1900.00 (V)
	HE X-Steerer 2	1500.00 (V)	1500.00 (V)	1500.00 (V)
	HE Y-Steerer 1	-2000.00 (V)	-2000.00 (V)	-2000.00 (V)
	HE Y-Steerer 2	-1000.00 (V)	-1000.00 (V)	-1000.00 (V)
	HEL 115 Magnet	298.34 (A)	340.29 (A)	340.23 (A)
	HEL Q-Pole 1 Focus	0.00 (%)	0.00 (%)	0.00 (%)
	HEL Q-Pole 1 Astigmatism	0.00 (%)	0.00 (%)	0.00 (%)
	HEL 65 Deflector	174.52 (kV)	173.98 (kV)	173.98 (kV)
	HEL Q-Pole 2 Focus	54.00 (%)	54.00 (%)	54.00 (%)
Bouncer Setup	HEL Q-Pole 2 Astigmatism	0.00 (%)	0.00 (%)	0.00 (%)
	Inner Bounce Voltage	0 (V)	1.2 (V)	1.2 (V)
	TOF Bounce Voltage	-1100 (V)	-540.9 (V)	-540.9 (V)
	Inner Times	0.7 msec	2.0 msec	2.0 msec
	TOF Times	0.3 msec	8.0 msec	8.0 msec
	Inner Deley	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$
	TOF Deley	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$
	Sweeps	5000	2000	2000
	Wait	100.0 $\mu\text{sec}$	100.0 $\mu\text{sec}$	100.0 $\mu\text{sec}$
	Gate Deley	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$	10.0 $\mu\text{sec}$
Vacuum (真空度)	Number of Block	600	200	200
	HV1(RI Source vacuum)	1.6e-7 mbar	1.7e-7 mbar	1.7e-7 mbar
	HV2(RI Recomb. vacuum)	9.7e-8 mbar	1.1e-7 mbar	1.1e-7 mbar
	HV3(Q-Snout vacuum)	1.6e-7 mbar	1.7e-7 mbar	1.7e-7 mbar
	HV4(Q-Pole vacuum)	2.2e-7 mbar	2.4e-7 mbar	2.4e-7 mbar
	HV5(HE Analysis vacuum)	3.4e-8 mbar	3.9e-8 mbar	3.8e-8 mbar
	HV6(BI Source vacuum)	1.5e-6 mbar	5.4e-6 mbar	5.8e-6 mbar
	HV7(BI Bouncer vacuum)	3.5e-7 mbar	8.0e-7 mbar	8.3e-7 mbar
	HV8(HEL Analysis vacuum)	3.0e-7 mbar	2.4e-7 mbar	2.4e-7 mbar

表 9  $^{129}\text{I}$  Analysis Scan 及び Mapping 一覧表

No.	機 器 名	ファイル名	備 考
1	BI Extraction Voltage	1006-062	図 23 参照 Ni Scan
2	BI Source Einzel Lens	1008-010	図 24 参照 Ni Scan
3	BI ESA Y-Steerer	1008-008	図 25 参照 Ni Scan
4	BI Bouncer Y-Steerer	1006-057	図 26 参照 Ni Scan
5	BI ESA	1008-024	図 27 参照 Ni Scan
6	BI Magnet	1008-003	図 28 参照 Ni Scan (注)
7	BI Blanking Y-Steerer	1008-004	図 29 参照 Ni Scan
8	BI Magnet Y-Steerer	1006-056	図 30 参照 Ni Scan
9	BI Bouncer Einzel Lens	1008-009	図 31 参照 Ni Scan
10	Q-Snout	1006-062	図 32 参照 Ni Scan
11	Q-Pole Focus	1008-014	図 33 参照 Ni Scan
12	Q-Pole Astigmatism	1008-015	図 34 参照 Ni Scan
13	HEL Q-Pole2 Focus	1008-016	図 35 参照 Ni Scan
14	HEL Q-Pole2 Astigmatism	1008-017	図 36 参照 Ni Scan
15	HEL 115° Magnet	1007-033	図 37 参照 Ni Scan
16	HE Y-Steerer1,2	1007-030	図 38 参照 Ni mapping
17	HE X-Steerer1,2	1008-032	図 39 参照 Ni mapping
18	Blanking X-Steerer, Recombinator Magnets	1008-019	図 40 参照 Ni mapping
21	BI ESA Y-Steerer	1012-003	図 41 参照 Iodine Scan
22	BI ESA	1012-006	図 42 参照 Iodine Scan
23	BI magnet	1012-001	図 43 参照 Iodine Scan
24	BI Blanking Y-Steerer	1012-008	図 44 参照 Iodine Scan
25	RI Recomb.Magnets	1012-005	図 45 参照 Iodine Scan
26	HEL 65°ESA	1012-007	図 46 参照 Iodine Scan (注)
27	BI Blanking Y-Steerer, Recombinator Magnets	1008-100	図 47 参照 Iodine mapping
28	BI Blanking Y-Steerer, Magnet Ysteerer	1008-101	図 48 参照 Iodine mapping

注) 機器の設定値は、測定の都度行うビーム強度のオプティマイズにより変わる。

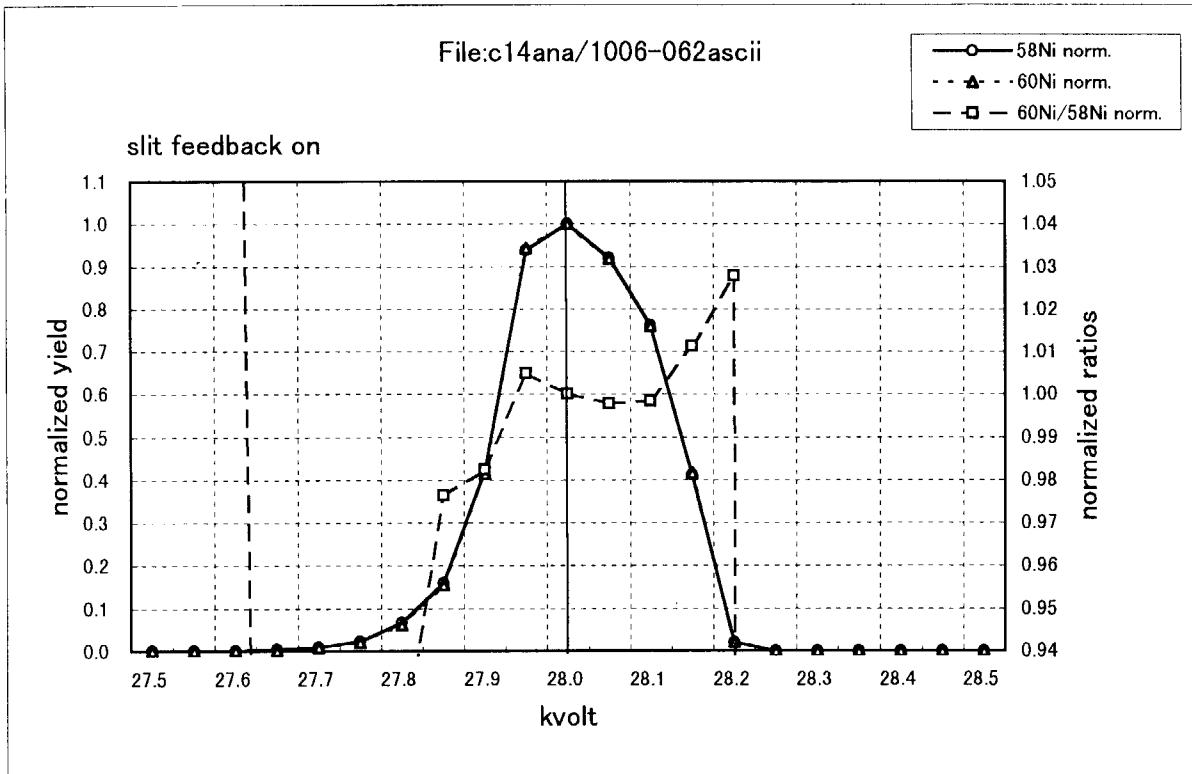


図23 Ni:Bi Extraction Voltage Analysis Scan

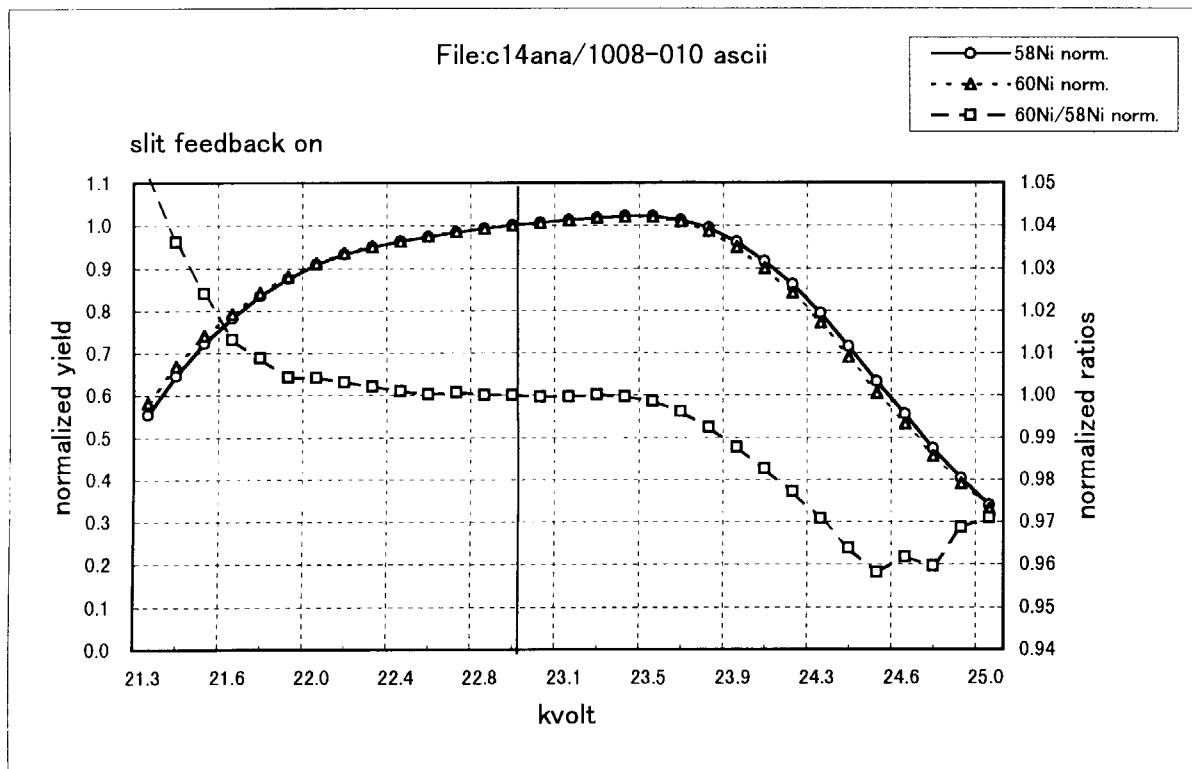


図24 Ni:Bi Source Einzel Lens Analysis Scan

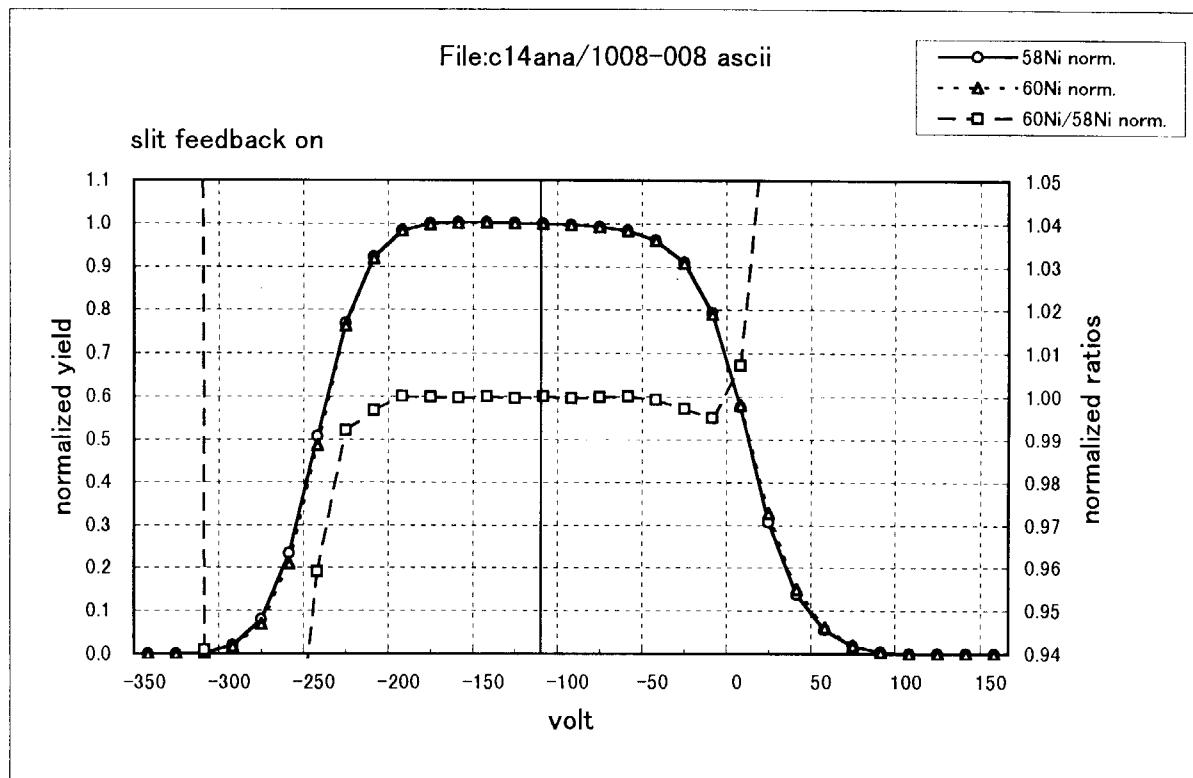


図25 Ni:Bi ESA Y-Steerer Analysis Scan

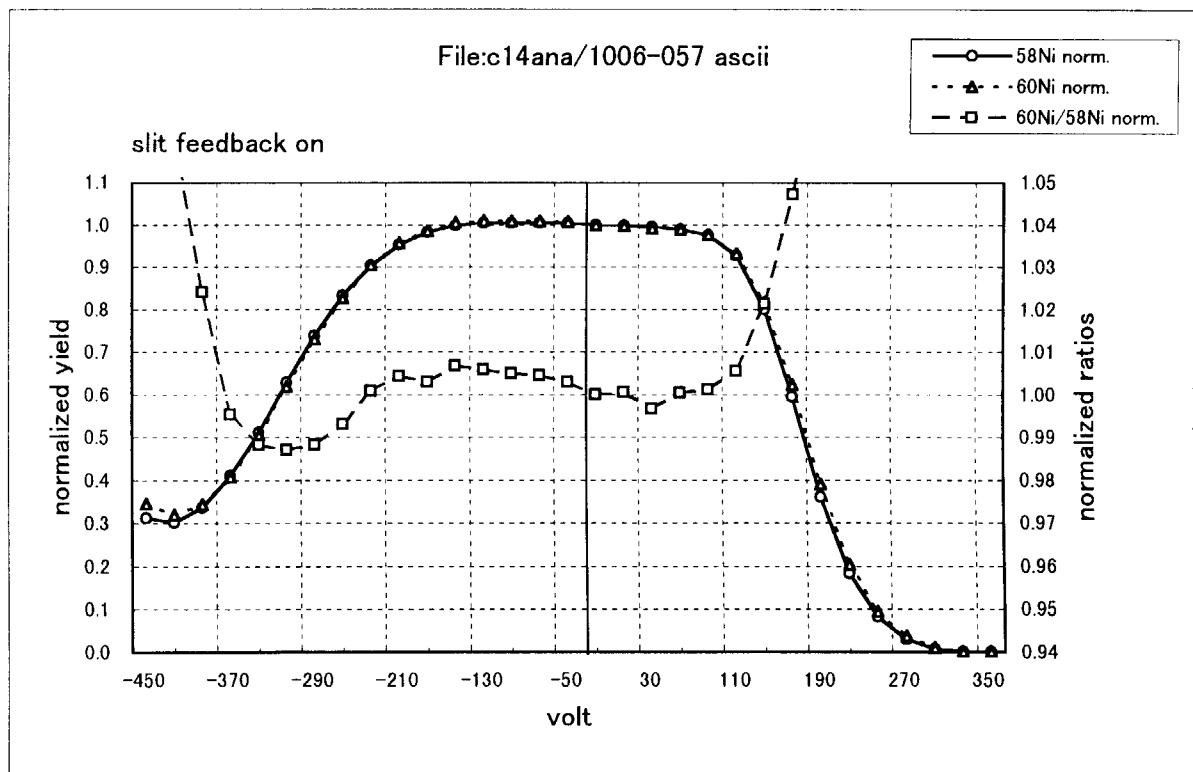


図26 Ni:Bi Bouncer Y-Steerer Analysis Scan

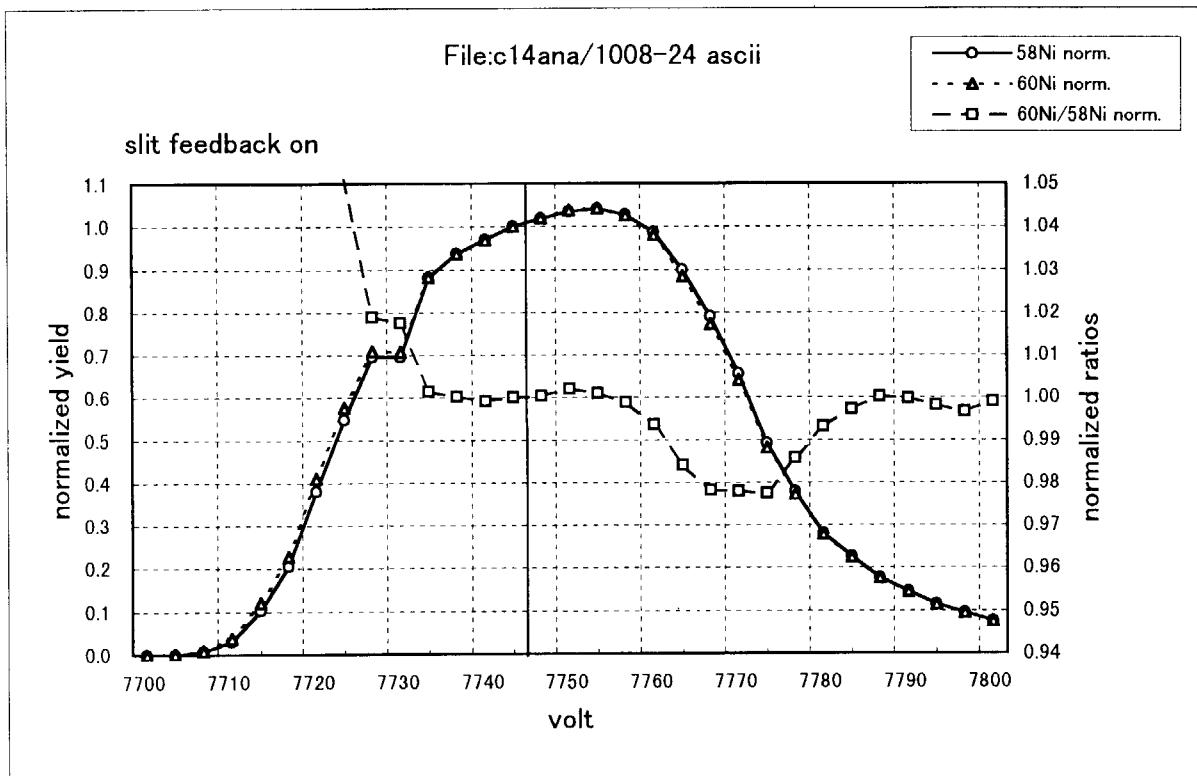


図27 Ni: BI ESA Analysis Scan

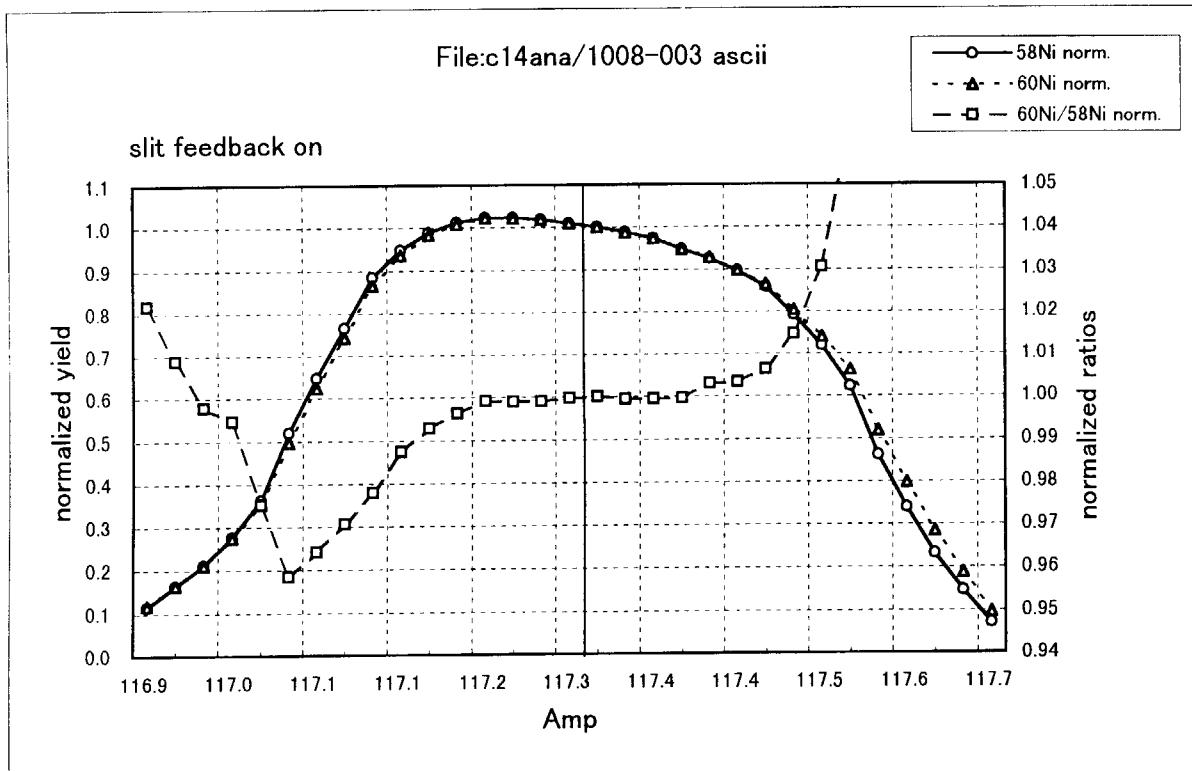


図28 Ni: BI Magnet Analysis Scan

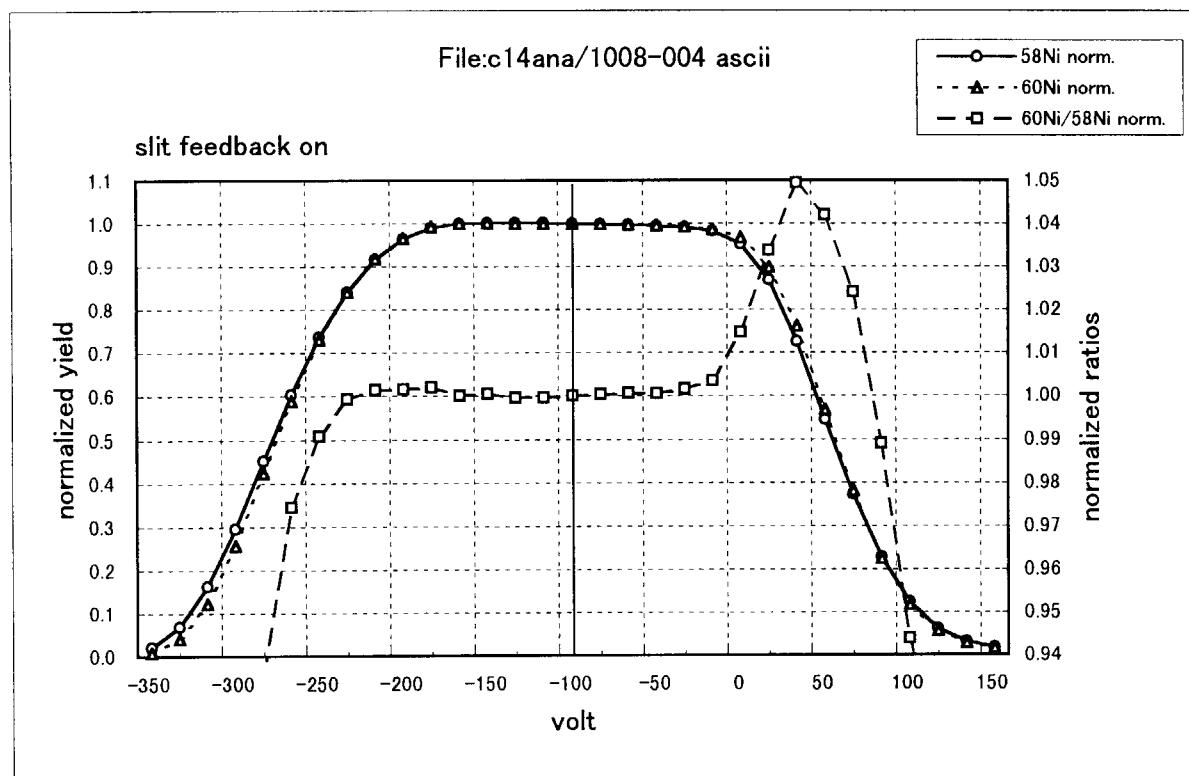


図29 Ni: BI Blanking Y-Steerer Analysis Scan

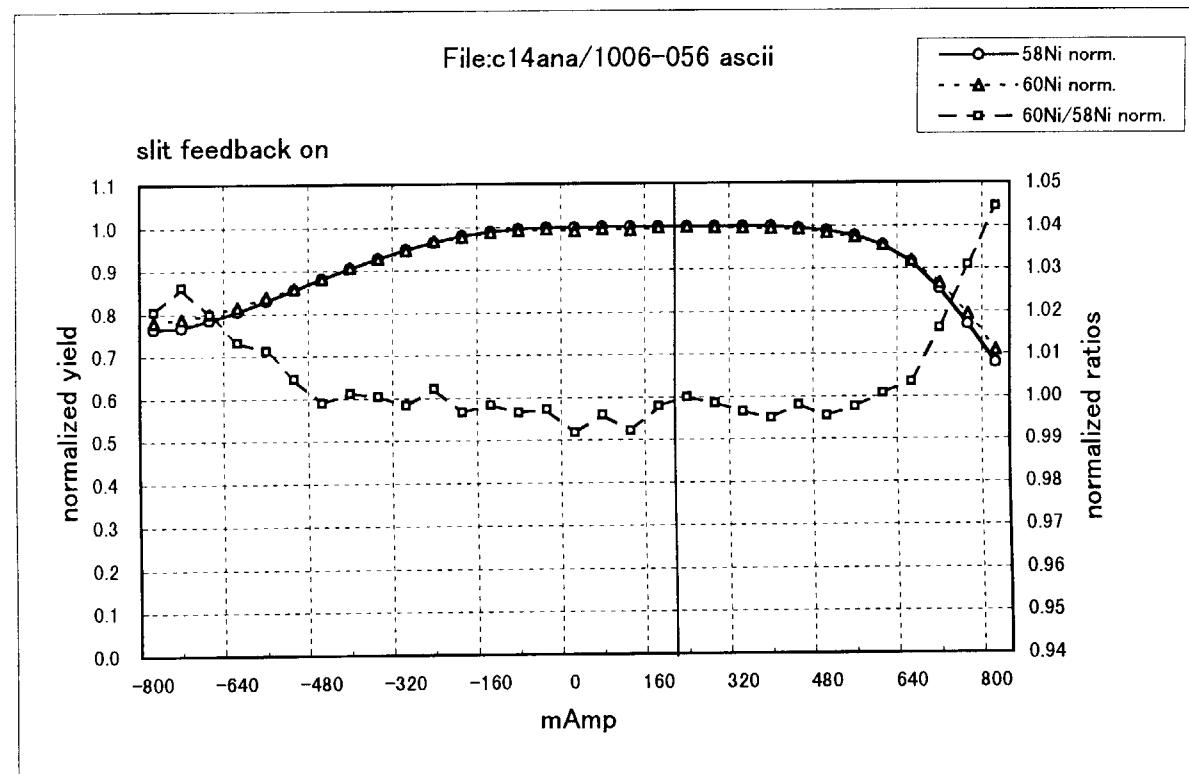


図30 Ni: BI Magnet Y-Steerer Analysis Scan

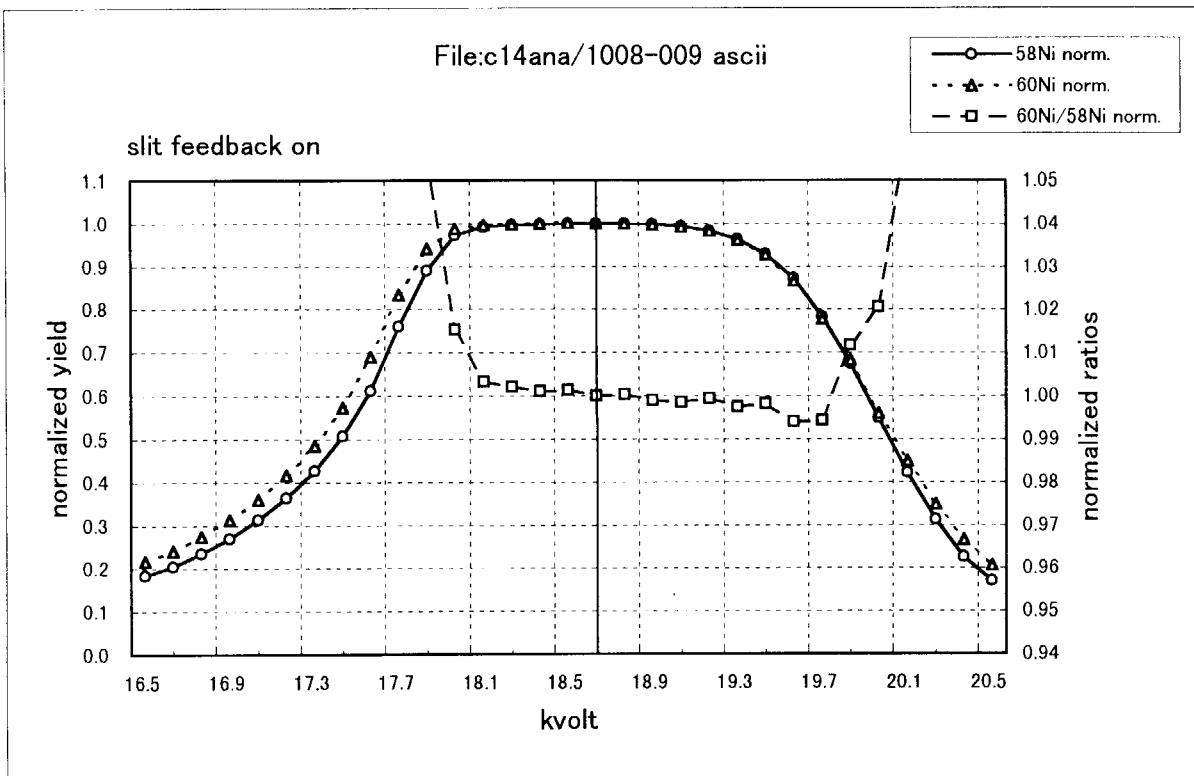


図31 Ni: Bi Bouncer Einzel Lens Analysis Scan

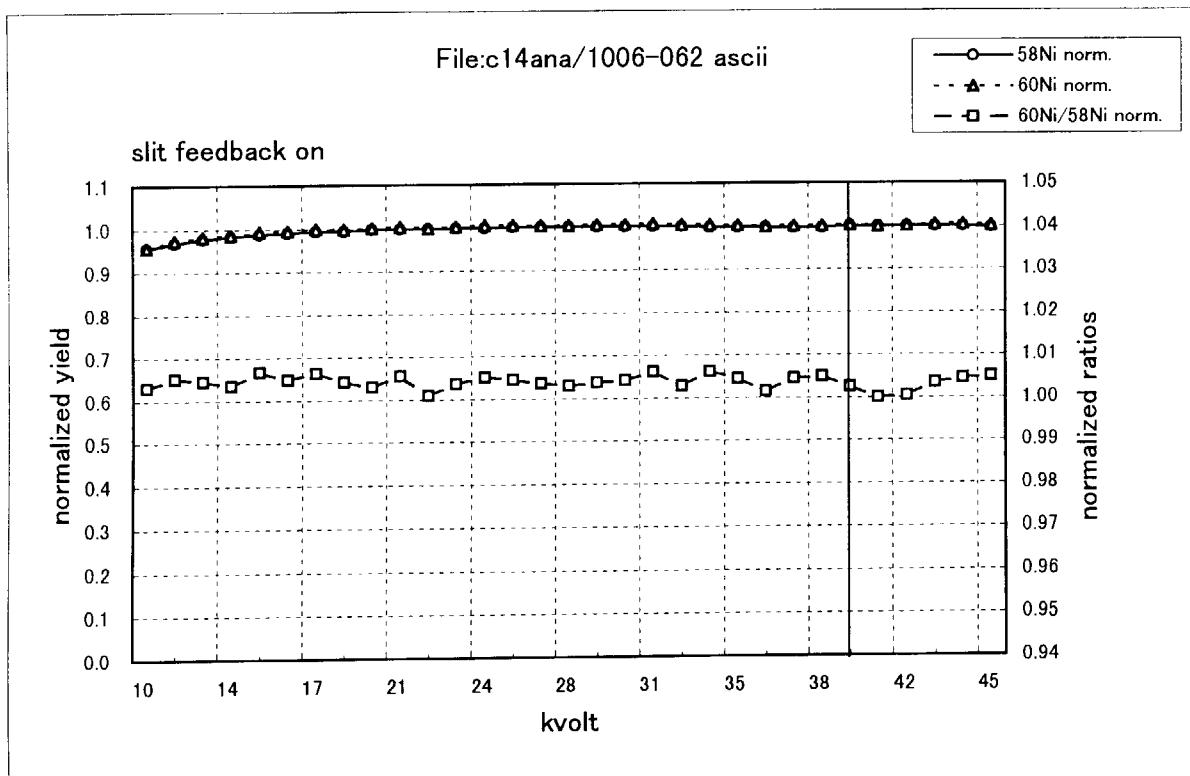


図32 Ni: Q-Snout Analysis Scan

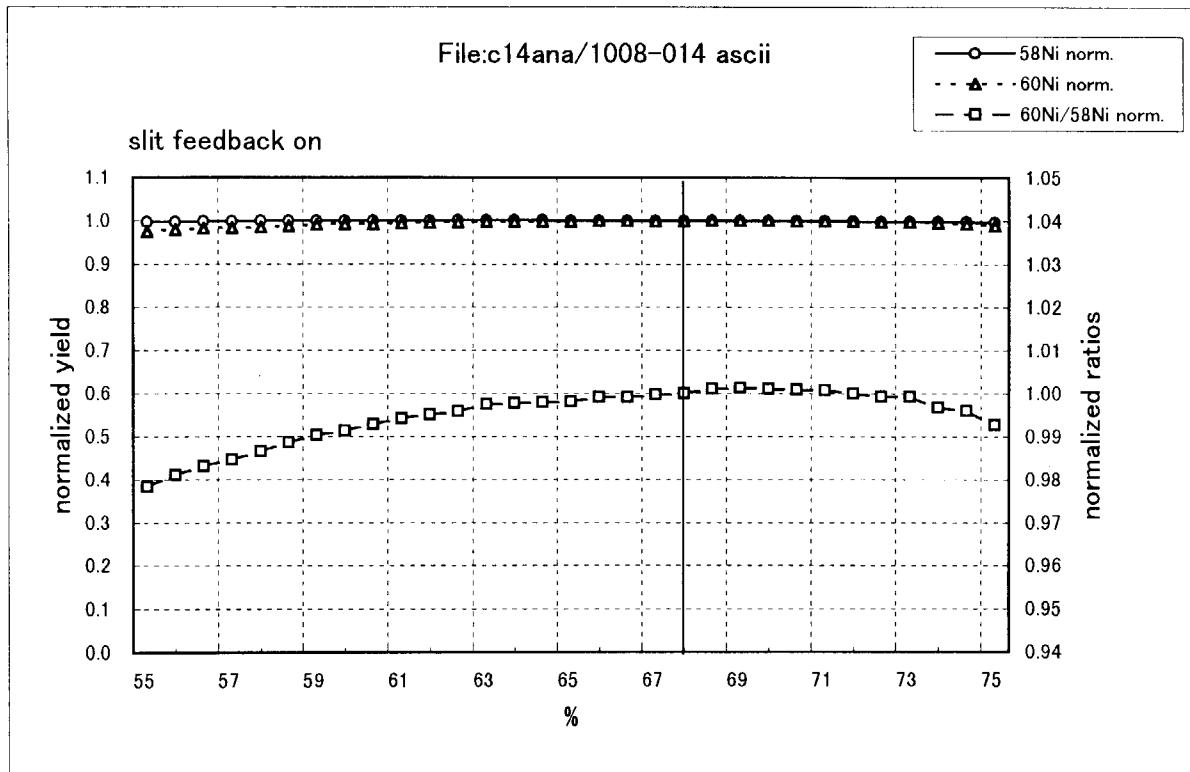


図33 Ni: Q-Pole Focus Analysis Scan

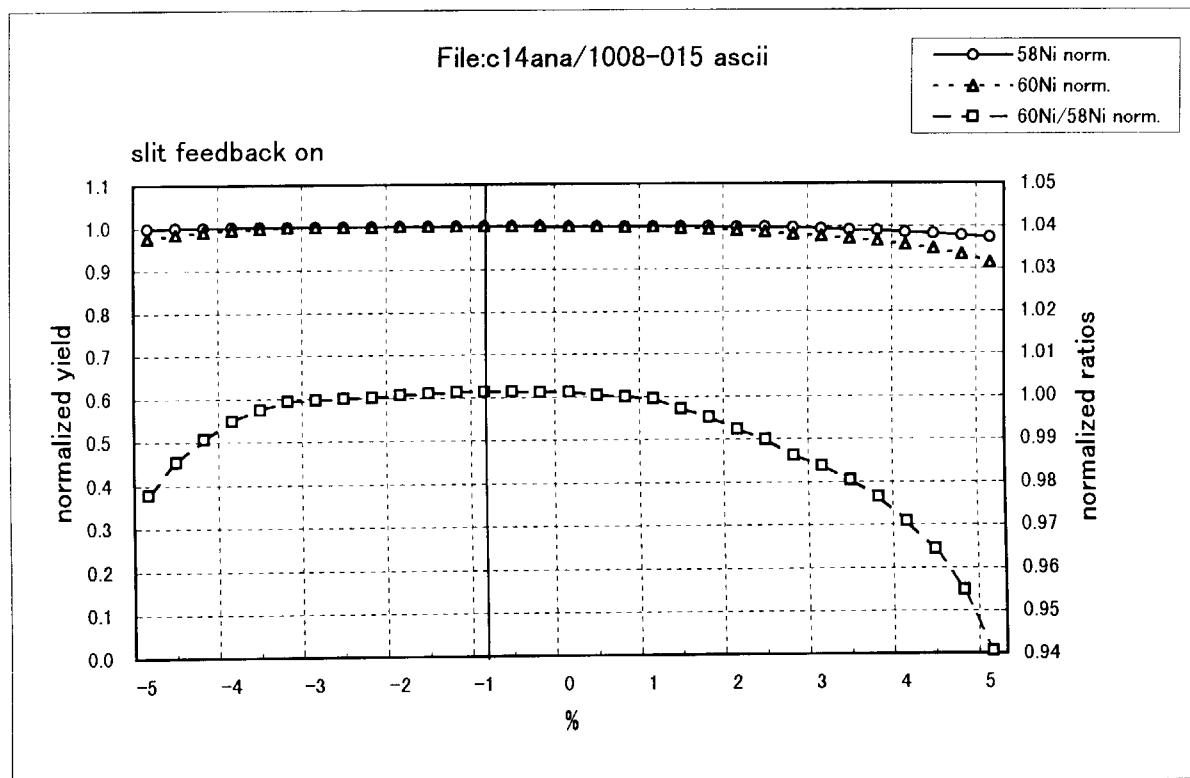


図34 Ni: Q-Pole Astigmatism Analysis Scan

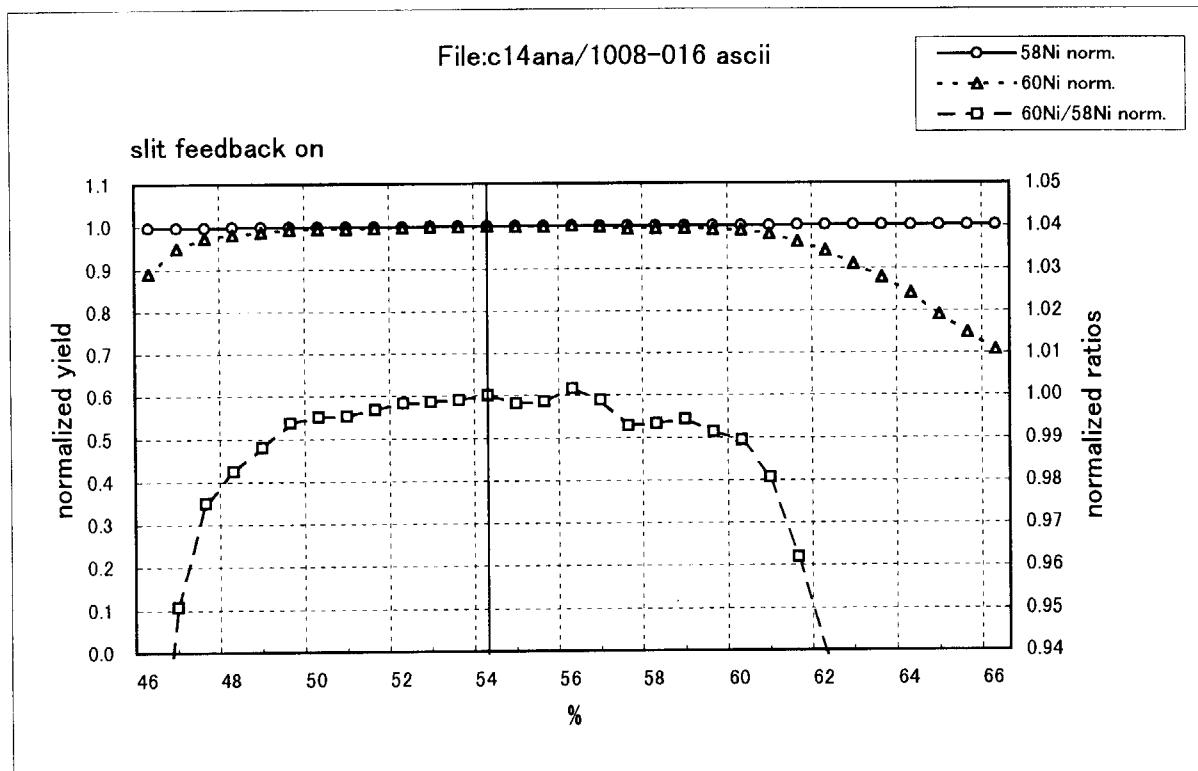


図35 Ni: HEL Q-Pole2 Focus Analysis Scan

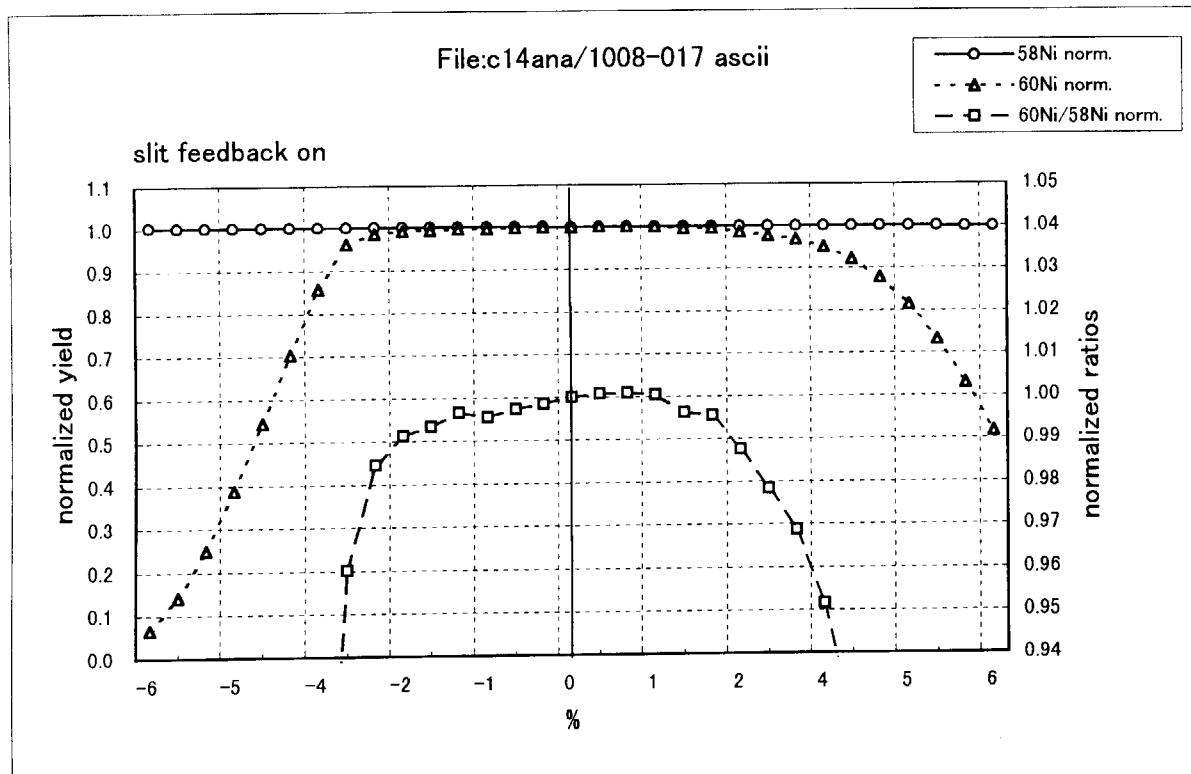


図36 Ni: HEL Q-Pole2 Astigmatism Analysis Scan

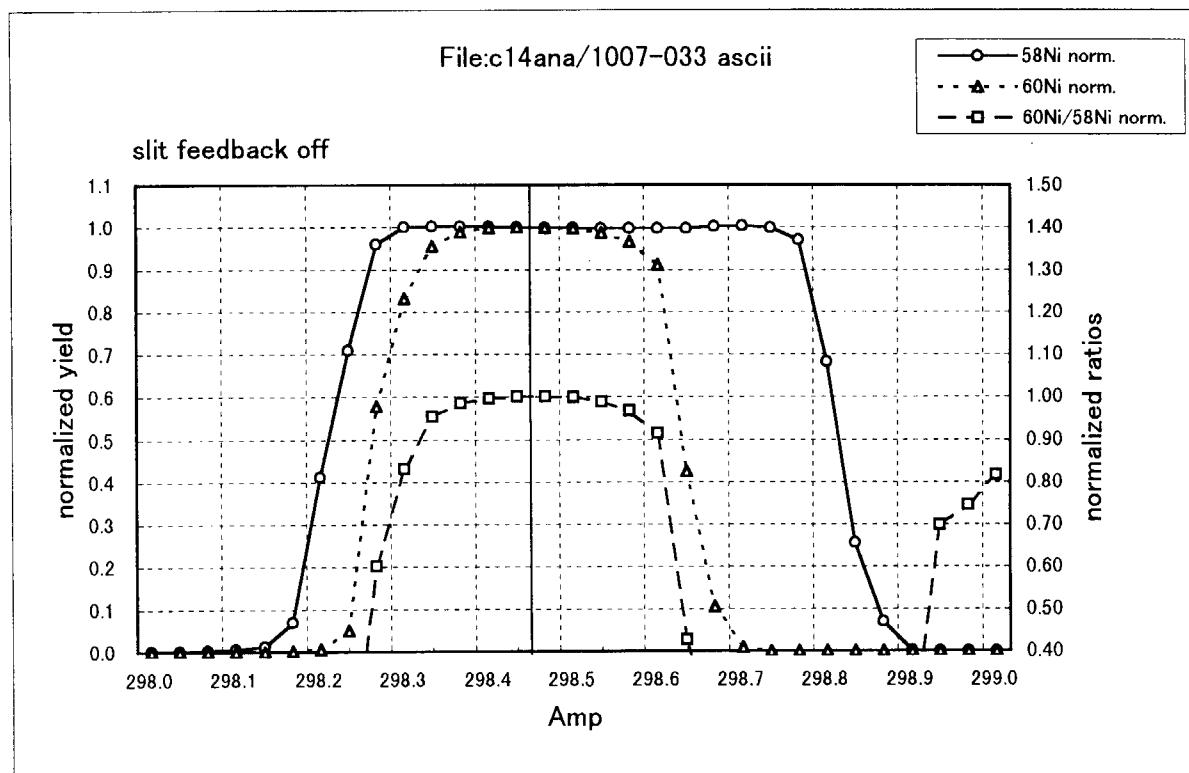


図37 Ni: HEL 115 Magnet Analysis Scan

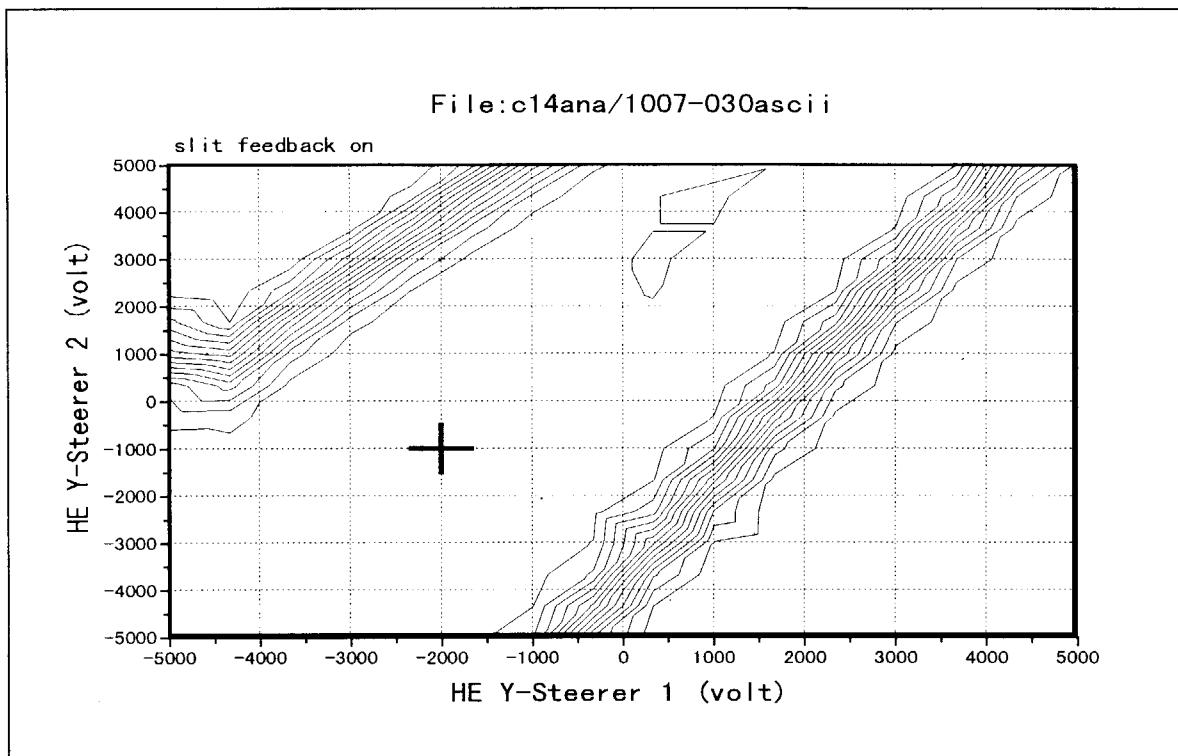


図38 Ni: HE Y—Steerer Mapping

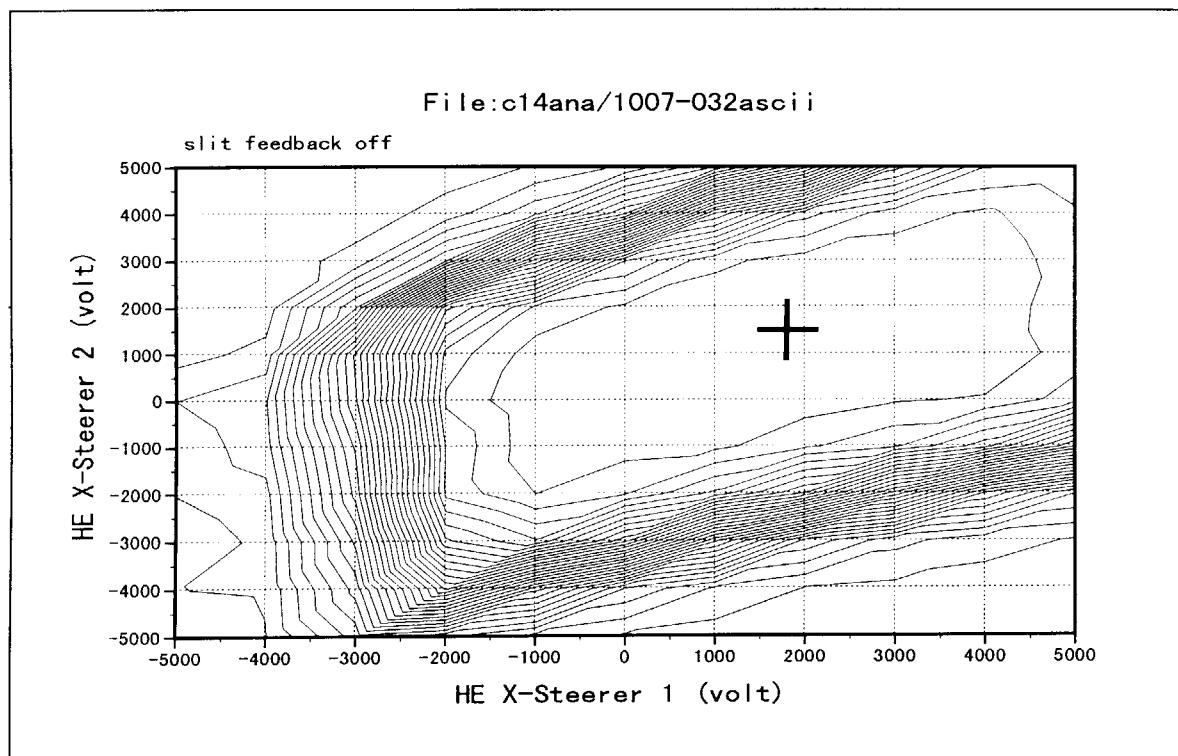


図39 Ni: HE X—Steerer Mapping

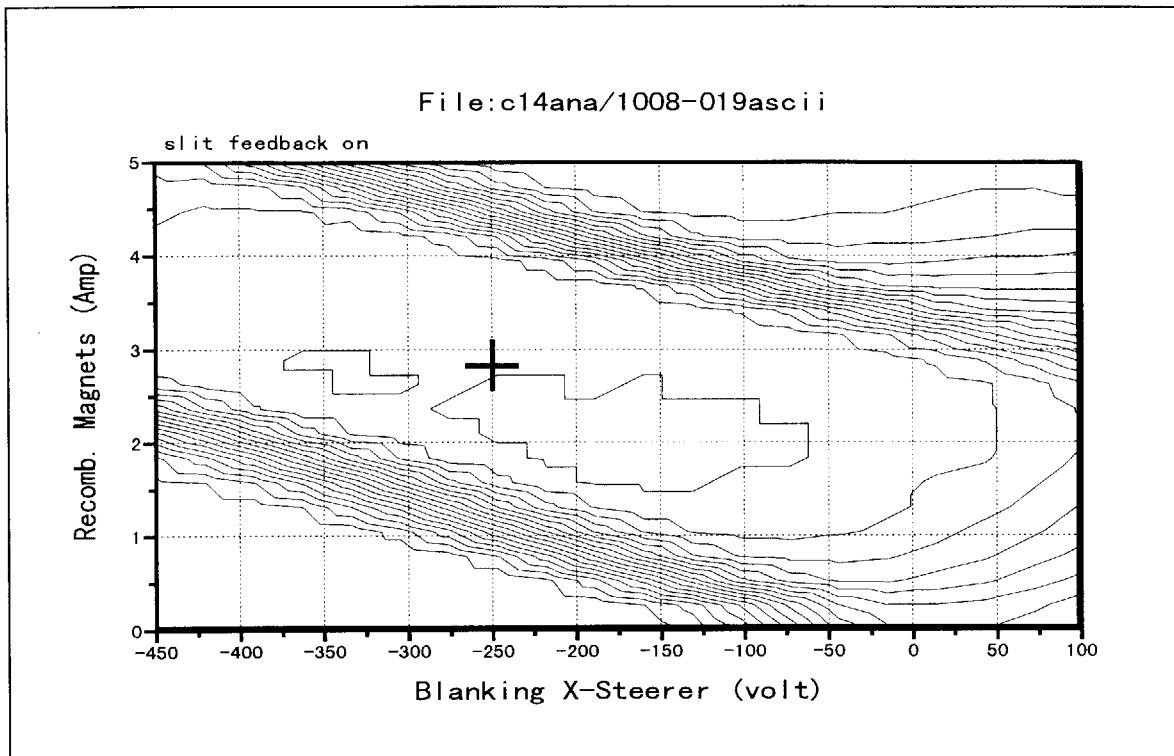


図40 Ni: Blanking X-Steerer, Recomb. -Magnets Mapping

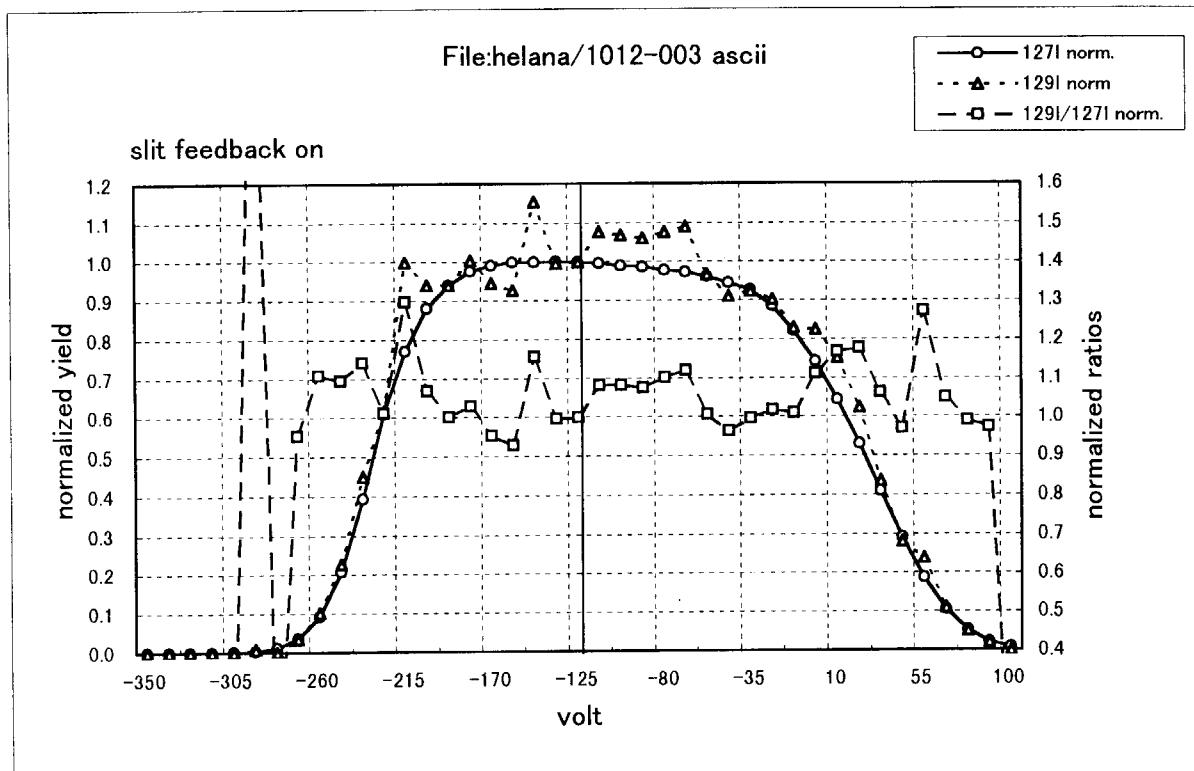


図41 Iodine: BI ESA Y-Steerer Analysis Scan

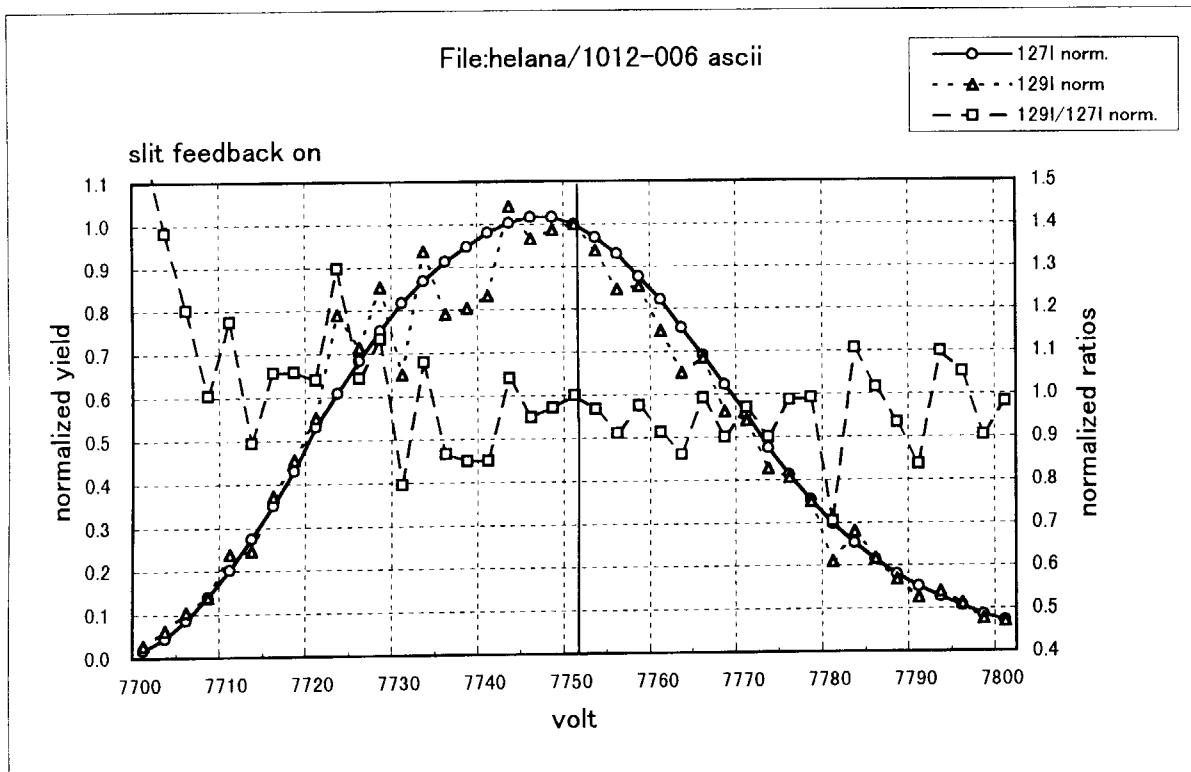


図42 Iodine: BI ESA Analysis Scan

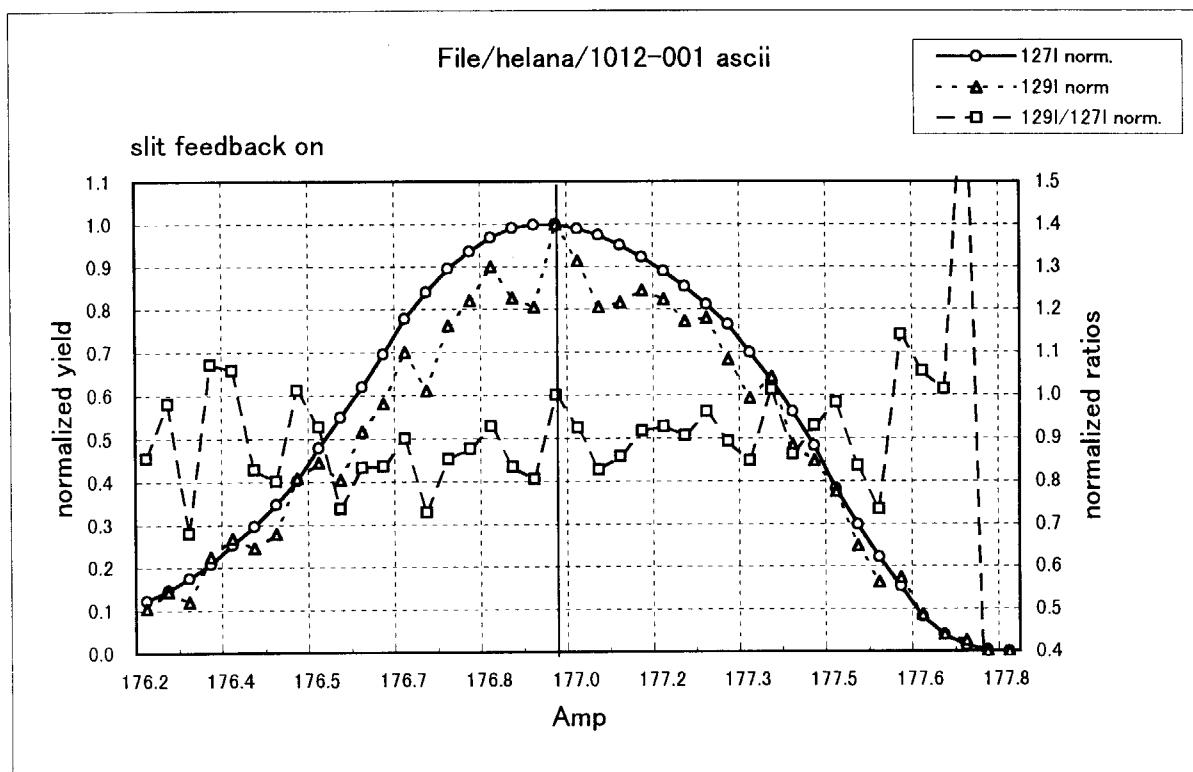


図43 Iodine: BI Magnet Analysis Scan

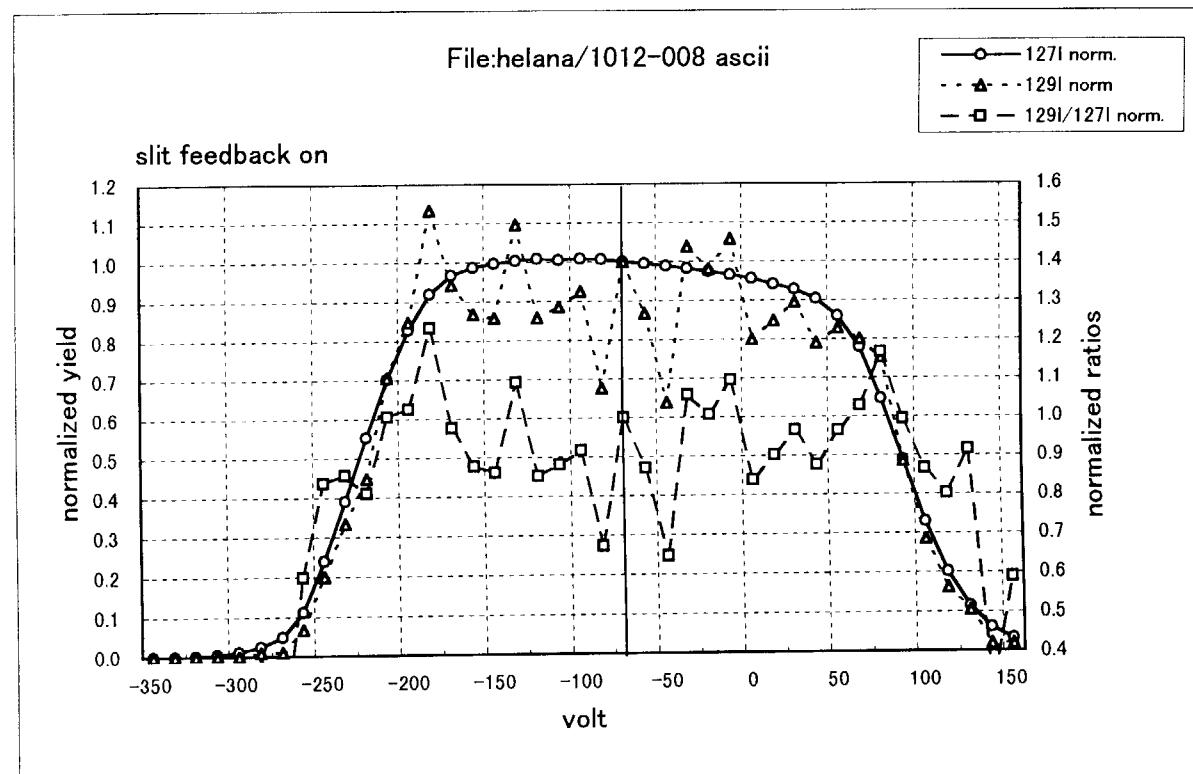


図44 Iodine: BI Blanking Y-Steerer Analysis Scan

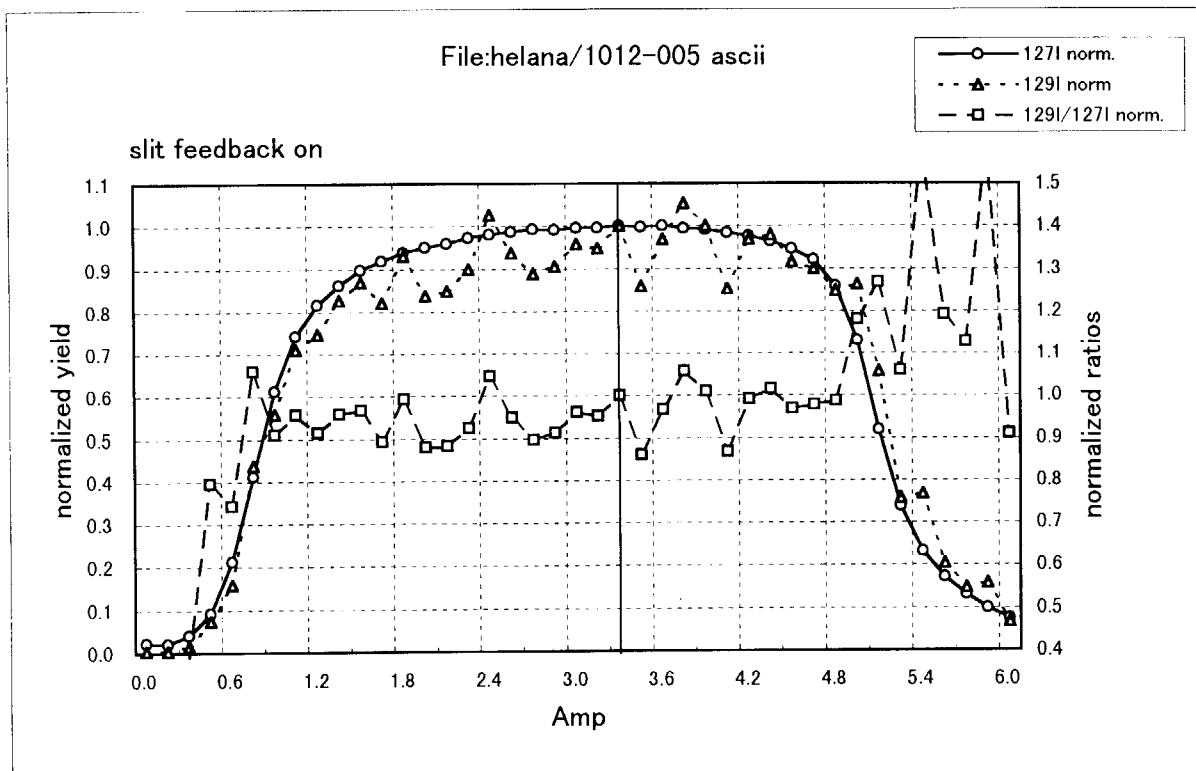


図45 Iodine: RI Recomb. Magnets Analysis Scan

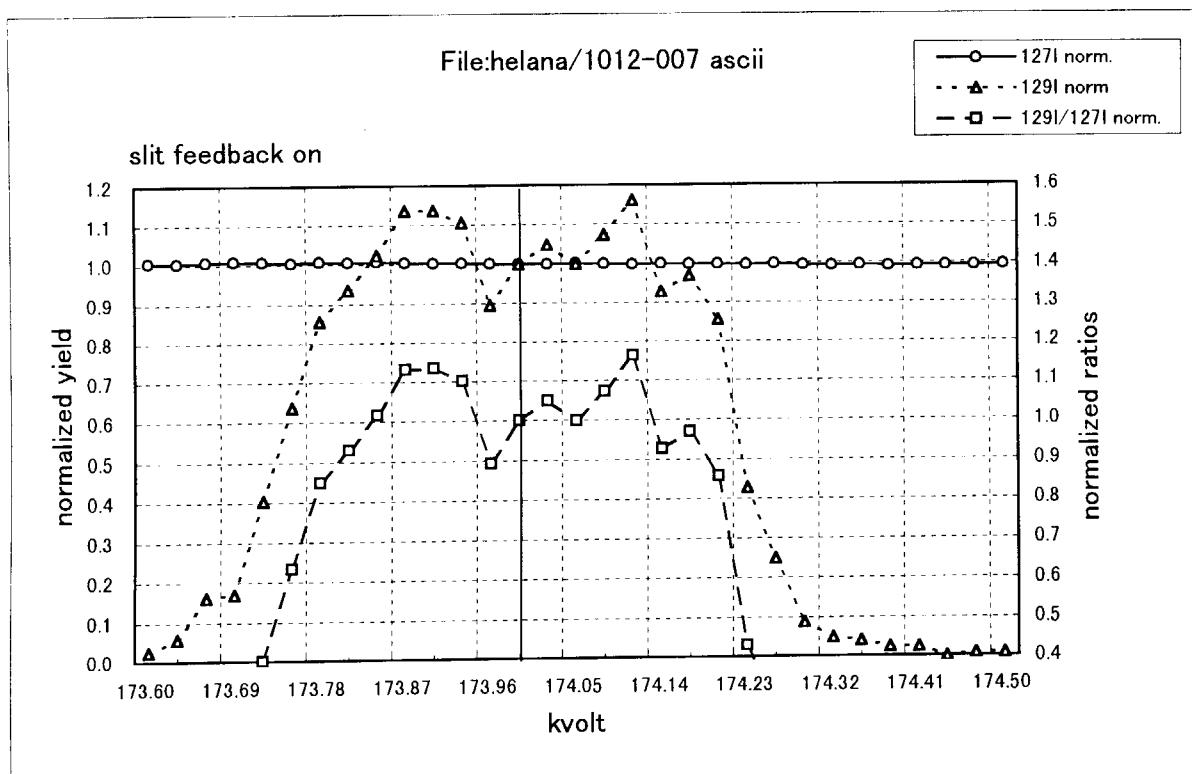


図46 Iodine: HEL 65 ESA Analysis Scan

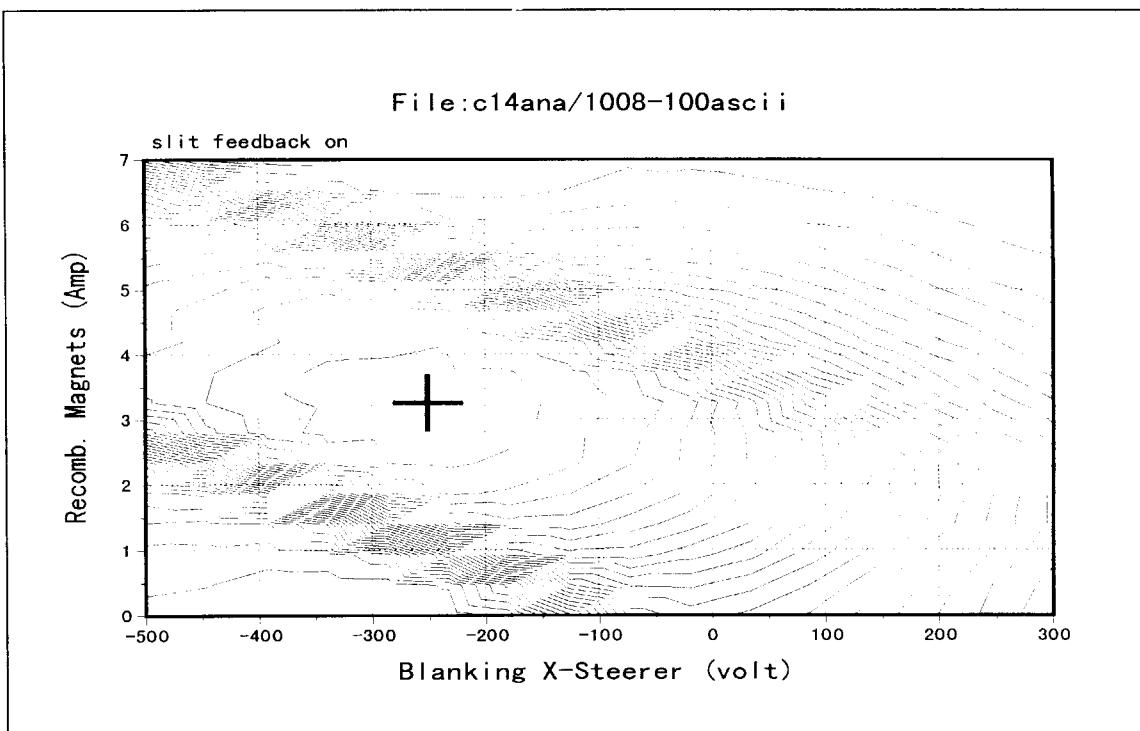


図47 Iodine: Blanking X-Steerer, Recomb. Magnets Mapping

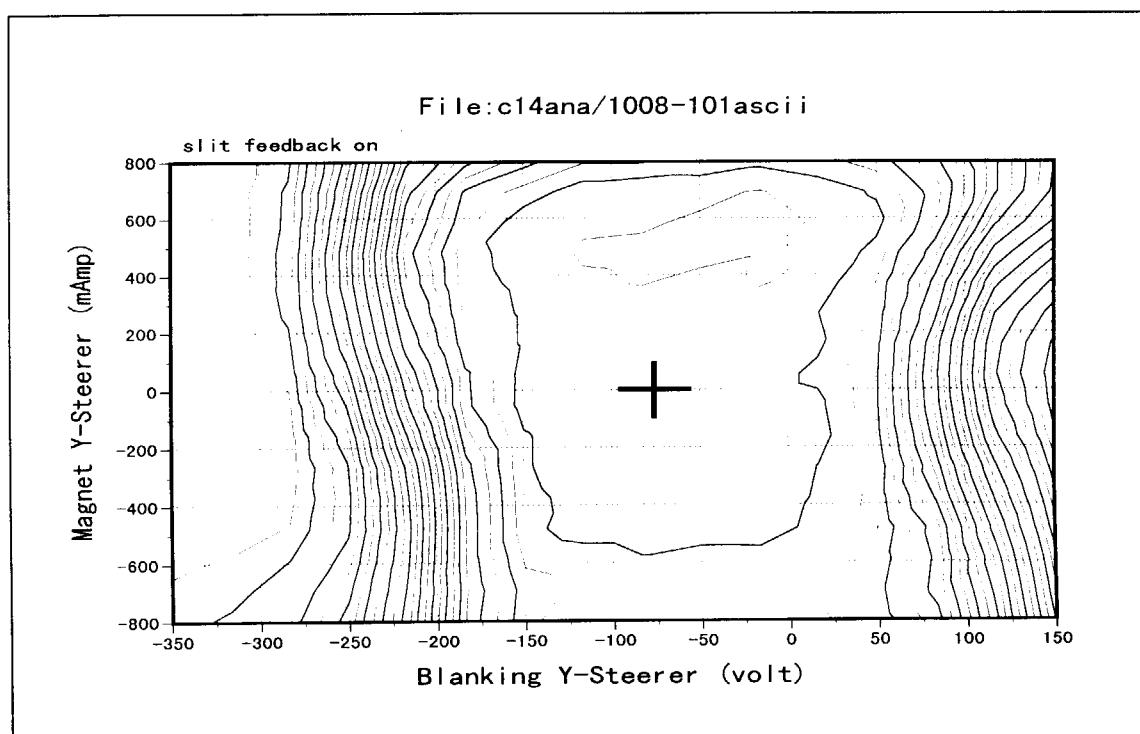


図48 Iodine: Blanking Y-Steerer, Magnet Y-Steerer Mapping

#### 4. 4 $^{129}\text{I}$ 測定精度に関する試験

$^{129}\text{I}$  測定精度に関する試験は、ヨウ素ラインのアライメントを確認する目的で、検出部に重イオン検出器を設置して1999年10月12日及び13日の両日行った。この試験は、 $^{129}\text{I} / ^{127}\text{I}$  比の変動係数（相対標準偏差）及びバックグランドの値をあきらかにした。相対標準偏差の確認試験は、カナダのトロントのISOTRACE研究所の加速器質量分析グループで製作した同一の5個のヨウ素試料を2セット用意して、両日各々1セットずつ用いた。

ヨウ素試料は、ヨウ化銀とニオブ粉末を1:2.5の割合で混合したもので、 $^{129}\text{I} / ^{127}\text{I}$  比が $1.1 \times 10^{-10}$ の標準試料である。また、バックグランド測定に使用した試料も、ISOTRACEグループにより製作されたものである。これら2種類の試料は、ISOTRACE研究所内において測定時に使用している標準試料とブランク試料である。

試験は、検出部に重イオン検出器を使用して加速電圧 2.5MV、加速される負イオンが荷電変換カナル内で5価の正イオンに変換されるようにストリッパガス濃度を調整して行った。

ヨウ素のイオン入射システムのバンサーのパラメーターは、下記のとおりである。

$$T_{127} = 2 \text{ m秒} (^{127}\text{I} \text{の入射時間})$$

$$T_{129} = 8 \text{ m秒} (^{129}\text{I} \text{の入射時間})$$

$$T_{\text{wait}} = 0.1 \text{ m秒} (^{127}\text{I}, ^{129}\text{I} \text{入射前の待ち時間})$$

$$T_{\text{sweep}} = 10.2 \text{ m秒} (1 \text{回の sweep にかかる時間})$$

2,000sweeps,20blocks の設定で1回の測定(single analysis)にかかる時間( $T_{\text{single}}$ )は、

$$T_{\text{single}} = 10.2 \text{ m秒} \times 2000 \times 20 = 408 \text{ 秒}$$

である。これらのパラメーターを用いて5試料を順(S1,S2,S3,S4,S5,S1,S2,...)に計数の統計誤差が1%に達するまで測定を繰り返した。

データの解析は、下記の式を用いて計算した。 $^{127}\text{I}$  の電流値は、高エネルギーイオン質量分析部のピックアップファラデーカップの電流値  $I_{\text{cup}}$  を代入して、 $^{129}\text{I}$  のカウント数は、重イオン検出器によるカウント数  $\text{Cnt}_{\text{det}}$  の値を代入して求めた。

$$^{127}\text{I} \text{の電流値} : ^{127}\text{I}_{\text{DC}} = I_{\text{cup}} \times T_{\text{sweep}} / T_{127}$$

$$^{129}\text{I} \text{のカウント数} : ^{129}\text{I}_{\text{CntDC}} = \text{Cnt}_{\text{det}} \times T_{\text{sweep}} / T_{129}$$

$$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}(1 \text{回の測定}) : R_{\text{single}} = (^{129}\text{I}_{\text{CntDC}} / T_{\text{single}}) / (^{127}\text{I}_{\text{DC}} / (5 \times 1.602 \times 10^{-19}))$$

10月12日及び13日の両日に行った測定結果を上記式に代入して、 $^{127}\text{I}_{\text{DC}}$ 、 $^{129}\text{I}_{\text{CntDC}}$  及び  $R_{\text{single}}$  を求めて、試料毎に纏めたものが表 10 及び表 11 である。さらに、 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  について、試料及び測定回数毎に統計処理して纏めたものが表 12 及び表 13 である。この表中の統計誤差("stat. error per sample","stat. error per run")は、 $1 / \sqrt{\text{average}(^{129}\text{I}_{\text{CntDC,selected sample or run}})}$  で表される。

試料に起因する統計誤差と試料の平均値からの相対標準偏差を比較することより重要な関係が示される。第1日及び第2日の各試料間の $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の変動係数（相対標準偏差）は、それぞれ0.61%及び0.86%で、計数の統計誤差は、それぞれ0.44%及び0.63%であり、このことから装置の高い安定性が確認された。なお、この両日のタンデトロンの運転状態を表8に示す。

バックグラウンドの確認は、第2日の相対標準偏差の確認試験の後に行った。1個のバックグラウンド試料の測定(single analysis)を3回行い、1224秒間( $T_{\text{single}} \times 3$ 回)に $^{129}\text{I}$ のカウントが合計37個計測され、計数の統計誤差は16.44%であった。その時の $^{127}\text{I}$ の直流電流の平均は343nAであり、バックグラウンド値（ $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 比の平均）が、 $8.99 \times 10^{-14}$ であることを確認した。<sup>3)</sup>

今後、検出部に飛行時間型検出器を据付け、今回の重イオン検出器による $^{129}\text{I}$ 測定精度に関する試験と同様の試験を行う予定である。

表10 Results of the first day (Oct.12.1999)

Sample45

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	137.47	6013	1.0935
run2	120.01	5152	1.0732
run3	152.54	6624	1.0856
run4	206.59	8991	1.0880
run5	163.69	7208	1.1009
run6	128.53	5560	1.0814
run7	115.86	5026	1.0845
run8	91.92	3986	1.0841
run9	86.93	3880	1.1158
ave.	133.73	5827	1.0897
std.			0.01245
total		52440	
rel.std.			1.14%

Sample47

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	151.07	6661	1.1023
run2	143.16	6228	1.0876
run3	149.04	6287	1.0546
run4	141.59	6113	1.0793
run5	136.88	5936	1.0842
run6	142.55	6215	1.0900
run7	139.47	6183	1.1083
run8	128.33	5620	1.0948
run9	111.45	4844	1.0865
ave.	138.17	6010	1.0875
std.			0.01530
total		54087	
rel.std.			1.41%

Sample51

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	200.63	8783	1.0944
run2	165.00	6990	1.0572
run3	146.31	6297	1.0759
run4	132.99	5716	1.0745
run5	116.67	5064	1.0851
run6	111.53	4898	1.0979
run7	104.33	4654	1.1162
run8	106.02	4498	1.0607
run9	101.70	4650	1.1430
ave.	131.69	5728	1.0894
std.			0.02732
total		51550	
rel.std.			2.51%

Sample52

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	196.33	8515	1.0842
run2	188.62	8177	1.0838
run3	177.77	7704	1.0835
run4	156.32	6728	1.0760
run5	134.14	5884	1.0966
run6	119.69	5173	1.0805
run7	109.72	4650	1.0595
run8	112.32	4769	1.0615
run9	105.40	4537	1.0761
ave.	144.48	6237	1.0780
std.			0.01160
total		56137	
rel.std.			1.08%

Sample53

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	93.35	4049	1.0843
run2	111.92	5001	1.1171
run3	110.82	4888	1.1027
run4	107.49	4723	1.1009
run5	114.57	5014	1.0941
run6	115.61	4967	1.0741
run7	101.52	4479	1.1030
run8	89.11	3922	1.1004
run9	83.82	3656	1.0904
ave.	103.13	4522	1.0963
std.			0.01241
total		40699	
rel.std.			1.13%

Sample	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
Sample45	133.73	52440	1.0897
Sample47	138.17	54087	1.0875
Sample51	131.69	51550	1.0894
Sample52	144.48	56137	1.0780
Sample53	103.13	40699	1.0963
ave.	130.24	50983	1.0882
std.			0.0066
total		254913	
rel.std.			0.61%

表11 Results of the second day (Oct 13,1999)

### Sample14

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	21.62	960	1.1100
run2	28.14	1274	1.1320
run3	35.01	1529	1.0919
run4	40.56	1852	1.1416
run5	48.70	2227	1.1433
run6	59.04	2527	1.0700
run7	77.56	3439	1.1085
run8	93.63	4211	1.1243
run9	90.72	4071	1.1218
run10	88.96	3914	1.0999
run11	85.54	3753	1.0968
ave.	60.86	2705	1.1127
std.			0.02249
total		29757	
rel.std.			2.02%

## Sample15

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	14.47	678	1.1717
run2	15.48	742	1.1984
run3	17.42	825	1.1840
run4	17.86	841	1.1769
run5	19.13	773	1.0103
run6	23.17	1061	1.1448
run7	26.56	1194	1.1238
run8	29.61	1345	1.1355
run9	33.82	1497	1.1066
run10	39.76	1774	1.1153
run11	44.92	1935	1.0770
ave.	25.65	1151	1.1313
std.			0.05450
total		12665	
rel.std.			4.82%

Sample16

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	19.59	911	1.1625
run2	24.55	1106	1.1262
run3	30.62	1396	1.1398
run4	39.83	1790	1.1236
run5	50.20	2238	1.1146
run6	59.76	2660	1.1128
run7	70.57	3172	1.1237
run8	79.63	3538	1.1107
run9	78.49	3444	1.0970
run10	79.27	3509	1.0670
run11	87.75	3877	1.1046
ave.	56.39	2513	1.1166
std.			0.02424
total		27641	
rel std			2.17%

Sample17

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	26.25	1146	1.0915
run2	34.66	1533	1.1056
run3	48.91	2188	1.1183
run4	63.71	2893	1.1352
run5	73.77	3287	1.1140
run6	87.64	3944	1.1250
run7	99.09	4539	1.1452
run8	102.00	4421	1.0841
run9	102.59	4499	1.1010
run10	99.25	4414	1.1118
run11	94.19	4261	1.1309
ave.	75.64	3375	1.1148
std.			0.01867
total		37125	
rel.std.			1.67%

Sample53

	$^{127}\text{I}$ DC $^{127}\text{I}$ curr. (nA)	$^{129}\text{I}$ DC $^{129}\text{I}$ counts	$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ ratio(E-10)
run1	26.88	1181	1.0983
run2	36.81	1637	1.1118
run3	42.91	1909	1.1123
run4	50.13	2159	1.0768
run5	60.46	2617	1.0822
run6	73.54	3351	1.1392
run7	84.57	3911	1.1562
run8	102.27	4446	1.0869
run9	104.40	4563	1.0927
run10	102.99	4495	1.0911
run11	99.82	4414	1.1055
ave.	71.34	3153	1.1048
std.			0.02434
total		34683	
rel std			2.20%

表12  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  Results of first day (Oct 12,1999)

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ (E-10)	run1	run2	run3	run4	run5	run6	run7	run8	run9	average per sample	rel.std.dev per sample in %	stat.error per sample ave. cnts in %
sample45	1.0935	1.0732	1.0836	1.0880	1.1009	1.0814	1.0845	1.0841	1.1158	1.0897	1.14%	1.31%
sample47	1.1023	1.0876	1.0546	1.0793	1.0842	1.0900	1.1083	1.0948	1.0865	1.0875	1.41%	1.29%
sample51	1.0944	1.0572	1.0759	1.0745	1.0851	1.0979	1.1162	1.0607	1.1430	1.0894	2.51%	1.32%
sample52	1.0842	1.0838	1.0835	1.0760	1.0966	1.0805	1.0655	1.0615	1.0761	1.0780	1.08%	1.27%
sample53	1.0843	1.1171	1.1027	1.1009	1.0941	1.0741	1.1030	1.1004	1.0904	1.0963	1.13%	1.49%
average per run	1.0917	1.0838	1.0805	1.0837	1.0922	1.0848	1.0943	1.0803	1.1024			
std.dev. per run in %	0.70%	2.03%	1.62%	1.01%	0.67%	0.85%	2.07%	1.71%	2.45%			
stat.error per run in %	1.21%	1.26%	1.25%	1.24%	1.31%	1.37%	1.41%	1.48%	1.52%			
total average	1.0882											
std.dev. from run ave.in %	0.68%											
stat.error. from run ave.in %	0.59%											
std.dev. from sample ave.in %	0.61%											
stat.error. from sample ave.in %	0.44%											

表13  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$  Results of second day (Oct 13,1999)

$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ (E-10)	run1	run2	run3	run4	run5	run6	run7	run8	run9	run10	run11	average per sample	rel.std.dev per sample in %	stat.error per sample ave. cnts in %
sample45	1.1100	1.1320	1.0919	1.1416	1.1433	1.0700	1.1085	1.1243	1.1218	1.0599	1.0968	1.1127	2.02%	1.92%
sample47	1.1714	1.1984	1.1840	1.1769	1.0103	1.1448	1.1238	1.1355	1.1066	1.1153	1.0770	1.1313	4.82%	2.95%
sample51	1.1625	1.1262	1.1398	1.1236	1.1146	1.1128	1.1237	1.1107	1.0970	1.0670	1.1046	1.1166	2.17%	1.99%
sample52	1.0915	1.1056	1.1183	1.1352	1.1140	1.1250	1.1452	1.0941	1.1010	1.1118	1.1309	1.1148	1.67%	1.72%
sample53	1.0983	1.1118	1.1123	1.0768	1.0822	1.1392	1.1562	1.0869	1.0927	1.0911	1.1055	1.1048	2.20%	1.78%
average per run	1.1267	1.1348	1.1293	1.1308	1.0929	1.1184	1.1315	1.1083	1.1038	1.0970	1.1030			
std.dev. per run in %	3.32%	3.27%	3.10%	3.20%	4.66%	2.66%	1.68%	2.04%	1.02%	1.76%				
stat.error per run in %	3.20%	2.82%	2.52%	2.29%	2.12%	1.92%	1.75%	1.67%	1.66%	1.66%				
total average	1.1160													
std.dev. from run ave.in %	1.38%													
stat.error. from run ave.in %	0.88%													
std.dev. from sample ave.in %	0.86%													
stat.error. from sample ave.in %	0.59%													

## 5. 遮蔽性能に関する評価及び検査

タンデトロンをむつ事業所大湊施設に設置するにあたり、タンデトロンの遮蔽性能に関する評価を行った。その評価内容について以下に述べる。なお、下記内容は、放射線発生装置の使用許可申請書に記載した内容の一部である。

### 5.1 発生放射線の位置及び強度

測定試料は、イオン源部でイオン化され、加速器本体で加速される。加速管に電圧が印加され高電界になると加速管内の加速電極表面から電子が放出され、さらに加速されたイオンが加速電極に衝突すると二次的に電子が発生する。これらの電子が、加速器本体中央部の高電圧ターミナルに向かって加速され、高電圧ターミナル内の荷電変換カナルに衝突し制動X線を発生する。X線が発生する位置は、荷電変換カナルが格納されている加速器タンク内部であり、その位置を図49に示す。

タンデトロンでは、原子番号がベリリウム以上の元素イオンを加速する。これらのイオンが衝突する可能性があるタンデトロン内部の主な構成部品は、スリット、マグネットチェンバー、ファラディカップ等であり、組成元素は、クロム、ニッケル、銅、タンタル等である。これらの元素にイオンビームが衝突した場合でも、そのイオンエネルギーがクーロンバリアの値を超えることがないため核反応は起こらない。従って、中性子線及び $\gamma$ 線の発生はない。

ゆえに、発生する放射線は加速器本体からのX線だけで、放射線発生源の強度は、タンデトロンの稼働中に加速器タンク表面から50cm離れた位置での線量当量率が  $2.5 \mu \text{Sv}/\text{h}$  以下になるよう設計・製作した。

一般的に、ある位置における線量当量率Dは、

$$D = S / (4 \times \pi \times r^2) \quad \dots \quad (1)$$

D : 各々の位置における線量当量率 ( $\mu \text{Sv}/\text{h}$ )

S : 放射線発生源の強度 ( $\mu \text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ )

r : 放射線発生源からの距離 (m)

で求められる。

放射線発生源の強度Sは、下記の条件を(1)式に代入すると、

- 1) 加速器タンク表面から50cm離れた位置での線量当量率 :  $2.5 \mu \text{Sv}/\text{h}$
- 2) 放射線発生源の位置 : 加速器タンク表面から60cm内部のタンク中心部

$$\begin{aligned} S &= D \times 4 \times \pi \times r^2 = 2.5 \mu \text{Sv}/\text{h} \times 4 \times 3.14 \times (0.5\text{m} + 0.6\text{m})^2 \\ &= 3.8 \times 10^1 (\mu \text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}) \end{aligned}$$

となる。

## 5.2 加速器本体からのX線による線量当量率及び線量当量

5.1で述べたようにタンデトロンから発生する放射線は、X線だけであり、その放射線発生源の強度は、 $3.8 \times 10^1 \mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2/\text{h}$ で、発生する位置は加速器タンク内部である。この条件で下記の場所における各々の距離を（1）式に代入して、線量当量率を算出する。また、1週間または3月間における線量当量は、下記の条件で評価する。

- 1) 放射線業務従事者の被ばく評価に係る1週間の立ち入り時間を48時間とする。
- 2) 事業所境界の被ばく評価に係るタンデトロンの運転時間は、3月間で最大2184時間（1日を24時間、3月を91日）とする。

### ①常時立ちに入る場所における線量当量

管理区域内に立ち入り作業を行う場所の中で、放射線発生源から最も近い距離は1.5mで、この位置はA点（図49参照）である。この位置における線量当量率は $1.3 \mu\text{Sv}/\text{h}$ であり、1週間の線量当量は $6.2 \times 10^1 \mu\text{Sv}$ である。

### ②管理区域境界における線量当量

放射線発生源から最も近い管理区域境界の位置はB点（図49参照）で、距離は1.8mである。この位置における線量当量率は $9.3 \times 10^1 \mu\text{Sv}/\text{h}$ であり、1週間の線量当量は $4.5 \times 10^1 \mu\text{Sv}$ である。

### ③制御室内における線量当量

制御室内で常時作業を行う位置はC点（図49参照）で、距離は9.1mである。この位置における線量当量率は $3.7 \times 10^{-2} \mu\text{Sv}/\text{h}$ であり、1週間の線量当量は $1.8 \mu\text{Sv}$ である。

### ④事業所境界における線量当量

事業所境界は、防護柵等で区切られ、みだりに事業所外の者が侵入できないようになっている。放射線発生源から事業所境界まで、最も近い位置はD点（図50参照）で、距離は48mである。この位置における線量当量率は $1.3 \times 10^{-3} \mu\text{Sv}/\text{h}$ であり、3月間の線量当量は $2.8 \mu\text{Sv}$ である。

## 5.3 評価結果のまとめ

各々の位置における線量当量率及び線量当量の評価結果を表14に示す。

- ①管理区域内の常時人の立ちに入る場所における1週間の線量当量は、1mSvを超えることはない。
- ②管理区域境界における1週間の線量当量は、 $300 \mu\text{Sv}$ を超えることはない。
- ③事業所境界におけるタンデトロンの運転に伴う3月間の線量当量は、 $250 \mu\text{Sv}$ を超えることはない。

さらに、タンデトロンの運転時における各地点での線量当量率を実測したので、その遮蔽性能検査について以下に述べる。

### 5.4 遮蔽性能検査

タンデトロンの運転に際して実施される施設検査の前に、炭素イオンを発生させイオン源出口のファラディカップのビーム電流が約 $30\ \mu$  のイオンビームをターミナル電圧2.5MVで加速して、各地点での線量当量率についてGM管式サーベイメータを用いて測定した。その測定結果から遮蔽性能を充分に満足していることが分かった。

1998年3月24日に施設検査が実施され、そのときの各地点での線量当量率について電離箱式サーベイメータを用いて測定した。その測定結果を図51に示す。さらに、線量当量率が一番高い場所E点（図51参照）及びその値を調べたところ、高エネルギー加速管の表面で $3.3\ \mu\text{Sv}/\text{h}$ であったが、この値でも1週間における線量当量限度を超えることはないことが分かった。

また、仮に加速電圧が3.0 MVまで上げたとき、線量当量率が加速電圧に比例するとしても、最大で  $3.3\ \mu\text{Sv}/\text{h} \times 3.0\text{ MV} / 2.5\text{ MV} \times 48\ \text{h} = 190\ \mu\text{Sv}/\text{週}$  になり、1週間における線量当量限度を超えることはないものといえる。

表14 各々の位置における線量当量率及び線量当量の評価結果

評価位置		放射線発生源からの距離 (m)	線量当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ )	線量当量率 ( $\mu\text{Sv}/\text{週}$ )	線量当量限度
管理区域内	A点	1.5	1.3	$6.2 \times 10^1$	$1000\ \mu\text{Sv}/\text{週}$
管理区域境界	B点	1.8	$9.3 \times 10^{-1}$	$4.5 \times 10^1$	$300\ \mu\text{Sv}/\text{週}$
制御室内	C点	9.1	$3.7 \times 10^{-2}$	1.8	—
事業所境界	D点	48.0	$1.3 \times 10^{-3}$	2.8*)	$250\ \mu\text{Sv}/3\text{月}$

\*) 単位は $\mu\text{Sv}/3\text{月}$ である。

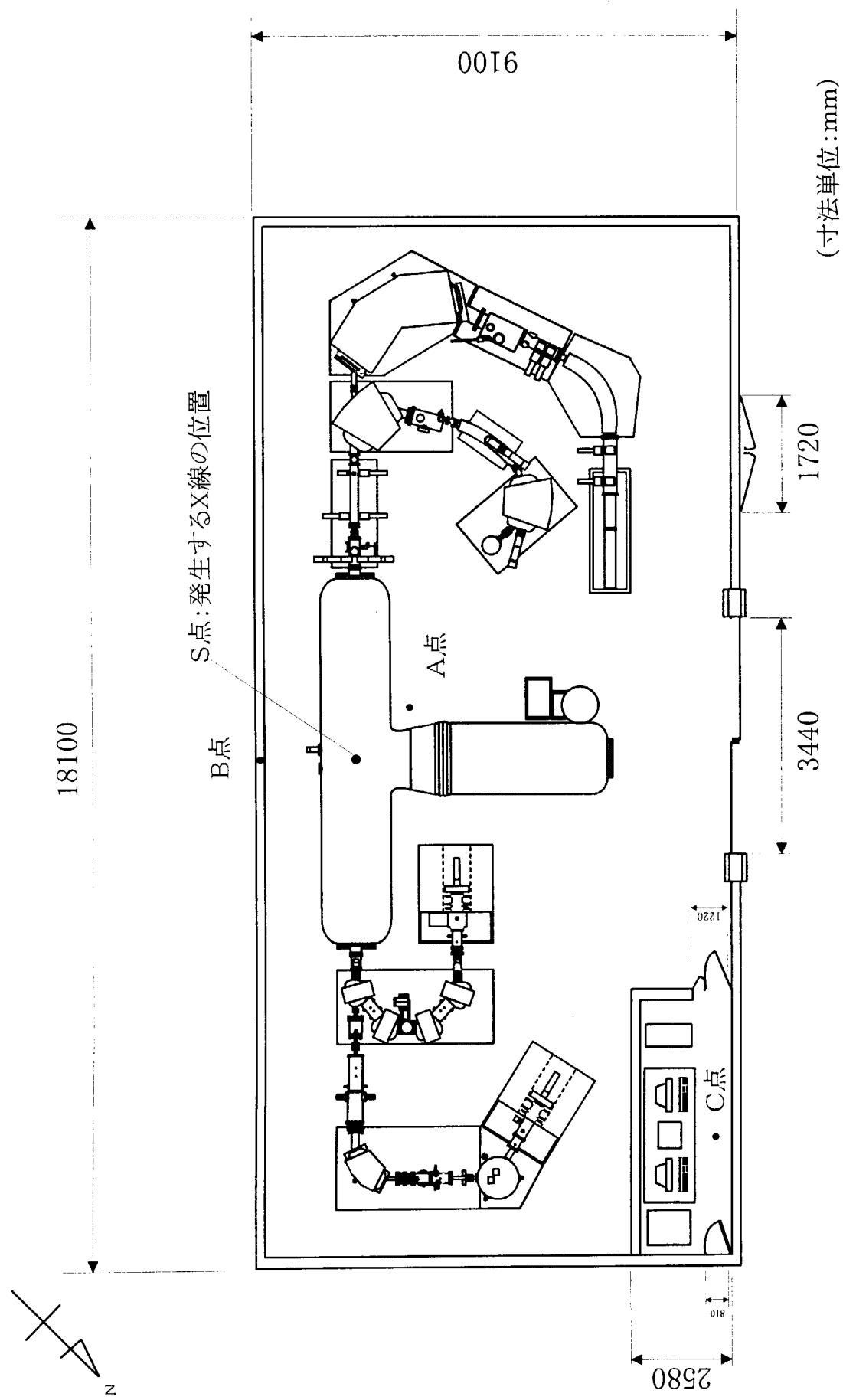


図49 加速器質量分析装置室の平面図

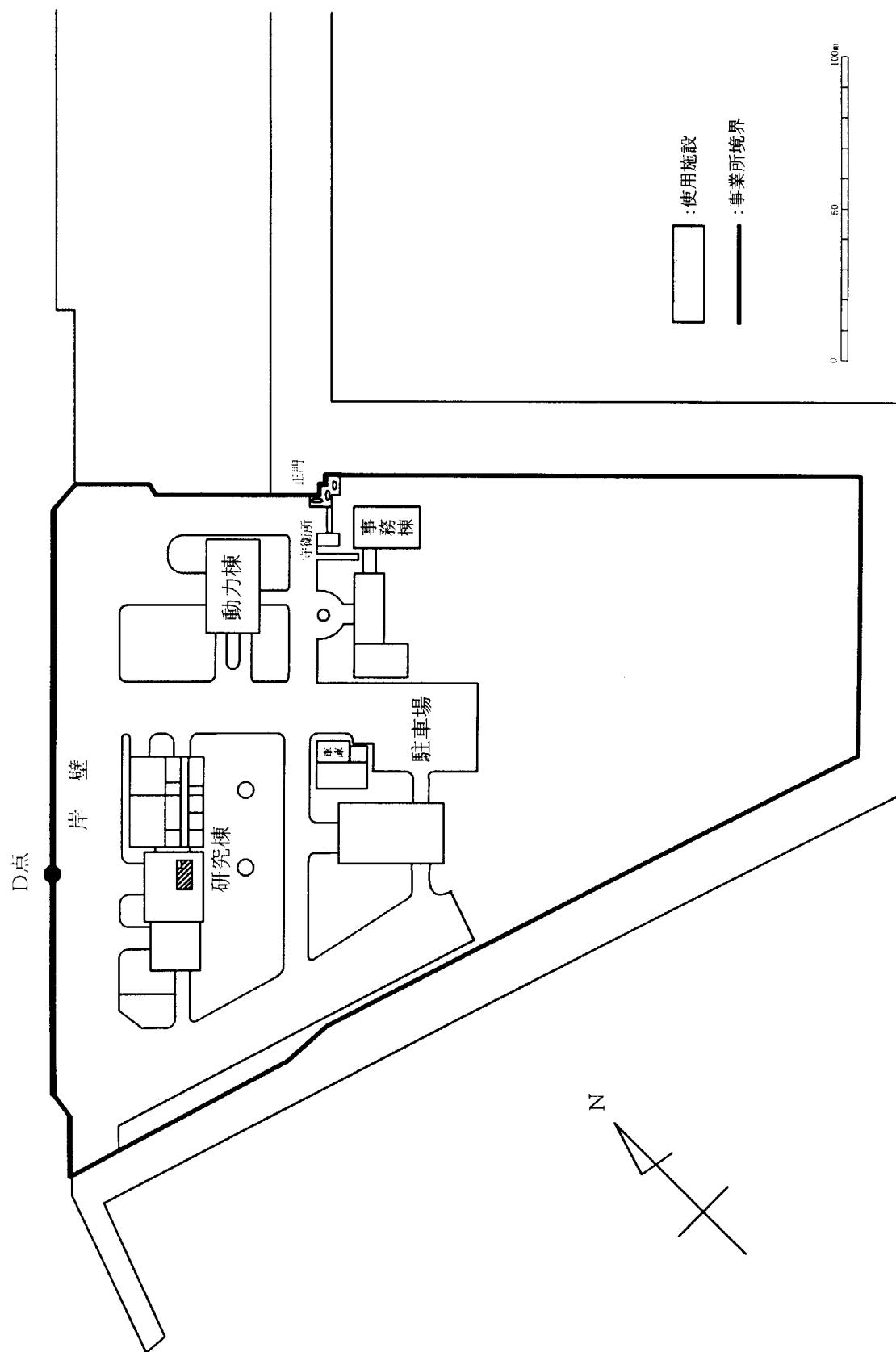


図 50 大湊施設全体図

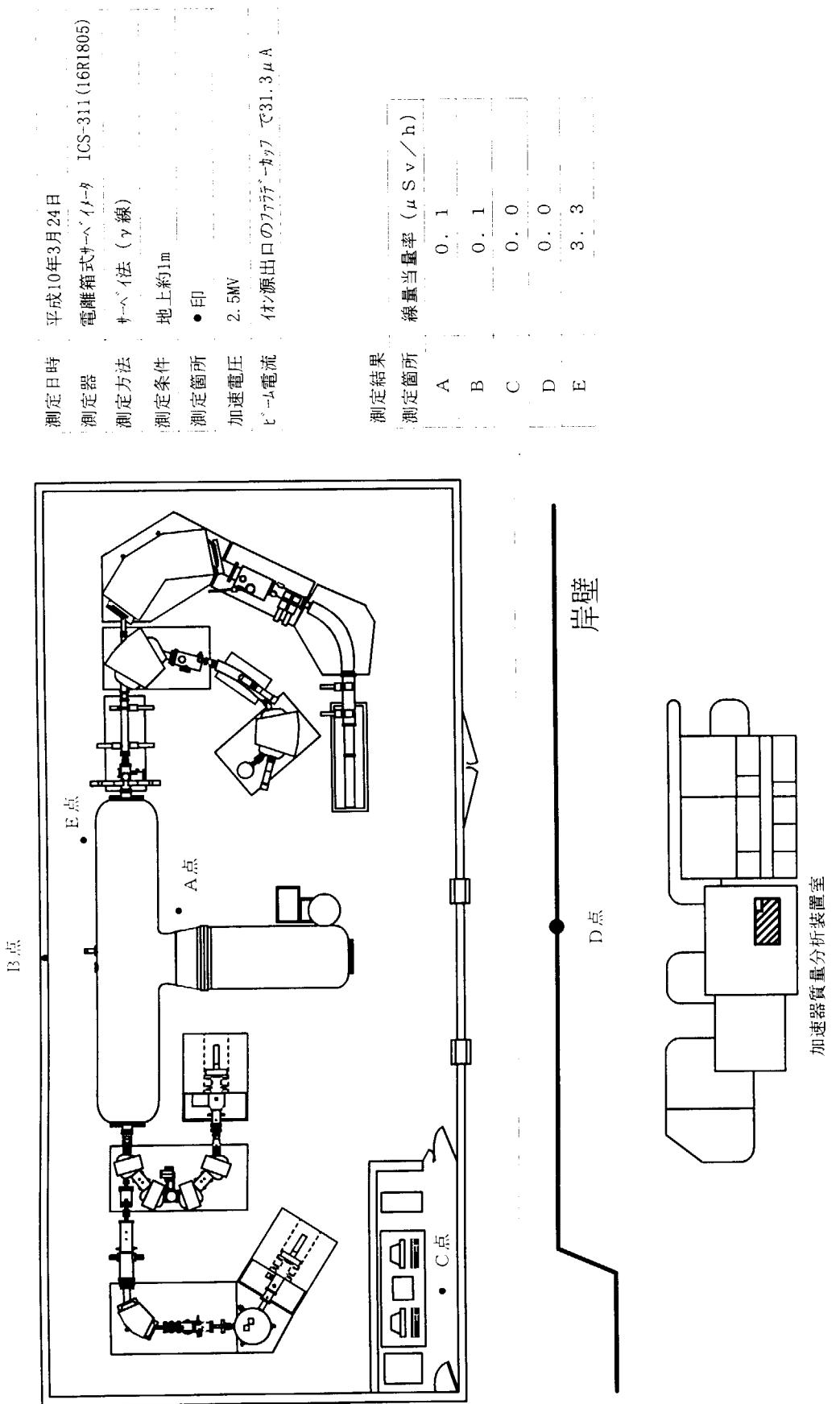


図 5.1 線量当量率の測定結果（加速器運転時）

## 6. 問題点とその改善対策

タンデトロンは、1997年5月からシステム全体の調整作業を開始した。前述したように調整の段階で加速器及び高エネルギーイオン質量分析部の静電アナライザーの不具合が発生したが、工場において修理及び改造が完了している。

ここでは、調整段階で発生した問題点とその改善対策に関してだけではなく、今後行われる試料測定に係わって予想される事項について述べる。

### 6.1 SF<sub>6</sub> ガスの水分除去

SF<sub>6</sub> ガスは、無色、無臭、無毒、不燃性、化学的安定性の高い化合物で、高電圧下における絶縁耐力、アークに対する消弧性に優れているため、一般に絶縁ガスとして使用され、本加速器タンク内の絶縁ガスとして使用されている。

SF<sub>6</sub> ガスの絶縁耐力は、SF<sub>6</sub> ガス中の水分に大きく影響されるため、SF<sub>6</sub> ガスについて露点管理を行うことは、タンデトロンにとって加速電圧を安定させ、それに付随する測定データの誤差をなくす意味で非常に重要なことである。

既設の設備では、加速器タンク内の保守整備のために、SF<sub>6</sub> 回収装置によりガスを「加速器タンクから外部のストレージタンクへ回収」及び「ストレージタンクから加速器タンクへ充填」することができる。SF<sub>6</sub> ガス中の水分除去を行うため、各配管ライン上には回収用及び充填用吸着塔が1基装備され、回収及び充填時にガスがそれぞれの吸着塔を通る設計となっていた。

この設備では、「ストレージタンクへ回収」及び「加速器タンクへ充填」の時にしかSF<sub>6</sub> ガス中の水分除去ができず、測定中で露点が高くなつた場合、測定を一旦中止してSF<sub>6</sub> ガスの回収及び充填の作業を行わなければならなく稼働率が下がることが予想された。

このため、既設の設備に下記の改良を行い、計画的にSF<sub>6</sub> ガス中の露点管理が行えるようにした。

- ・ 加速器タンク圧が約8 bar（測定時）の状態で、SF<sub>6</sub> ガスが吸着塔2基を経由してタンクに戻れる循環ラインを追加した。

- ・ SF<sub>6</sub> ガスが循環中にガス中の露点温度を計測できるように、循環ラインに露点計を設置した。

このことにより、保守点検等で計画的に測定を中止する時に水分除去を行うことができ、メーカーで推奨するSF<sub>6</sub> ガス中の露点温度を常時 -40°C以下に維持できるようになった。改良後のSF<sub>6</sub>回収装置の配管系統図を図52に示す。そして、SF<sub>6</sub> 回収装置全体を写真13に示す。

## 6.2 ターゲットプレス機の製作

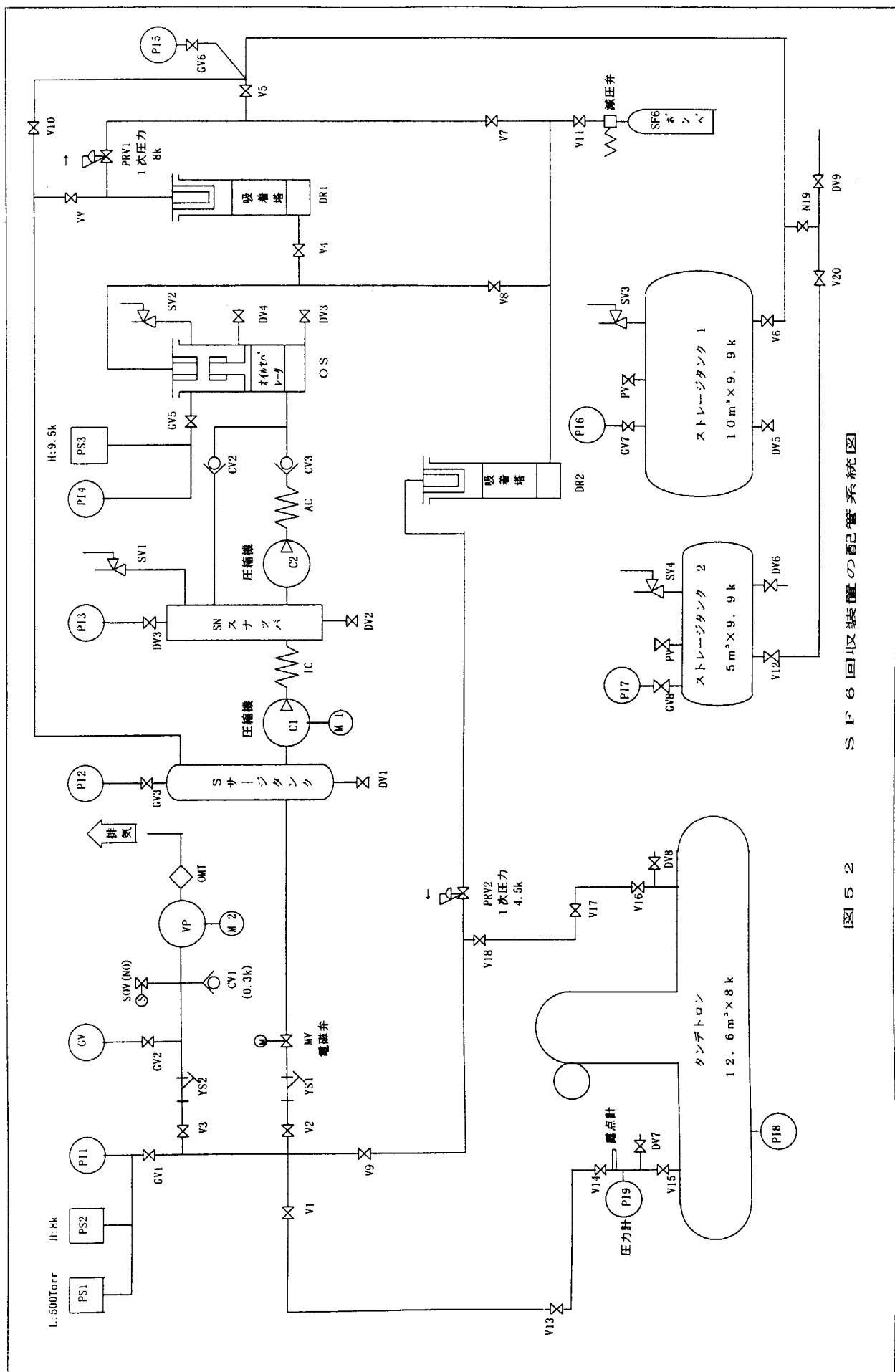
現在、当研究室は、 $^{14}\text{C}$  の測定を行うために海水試料中に含まれる溶存無機炭素を二酸化炭素として抽出し、その二酸化炭素からグラファイト試料を作製している<sup>4), 5)</sup>。

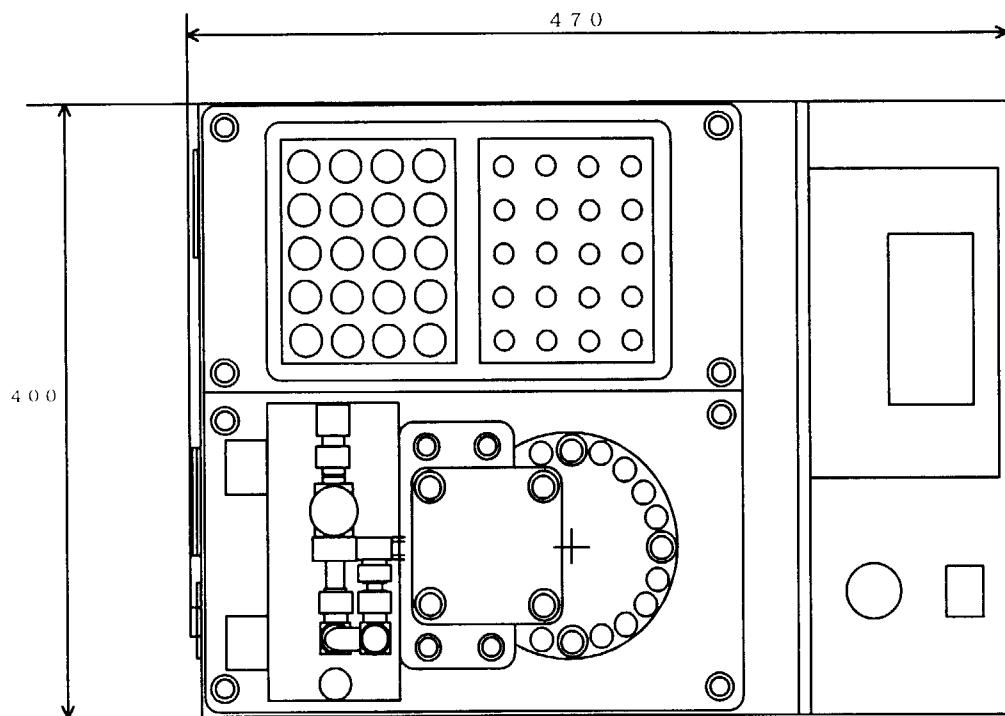
このグラファイト試料をイオン源に導入して炭素イオンを発生するためには、ターゲットホルダーと呼ばれる円柱状の先端の穴(2mm  $\phi$ )にグラファイト試料を詰め込みプレスする必要がある。当研究室は、HVEE社製の簡易的な手動のターゲットプレス機を所有しているが、1試料ごとにしか処理できずプレス圧が確認できないものである。

今後予定される測定試料数、ターゲットプレスの均一性、再現性等を考慮すると既設のプレス機では満足できるものではなく、下記内容の機能を有するターゲットプレス機(図53及び写真14)を製作することとした。

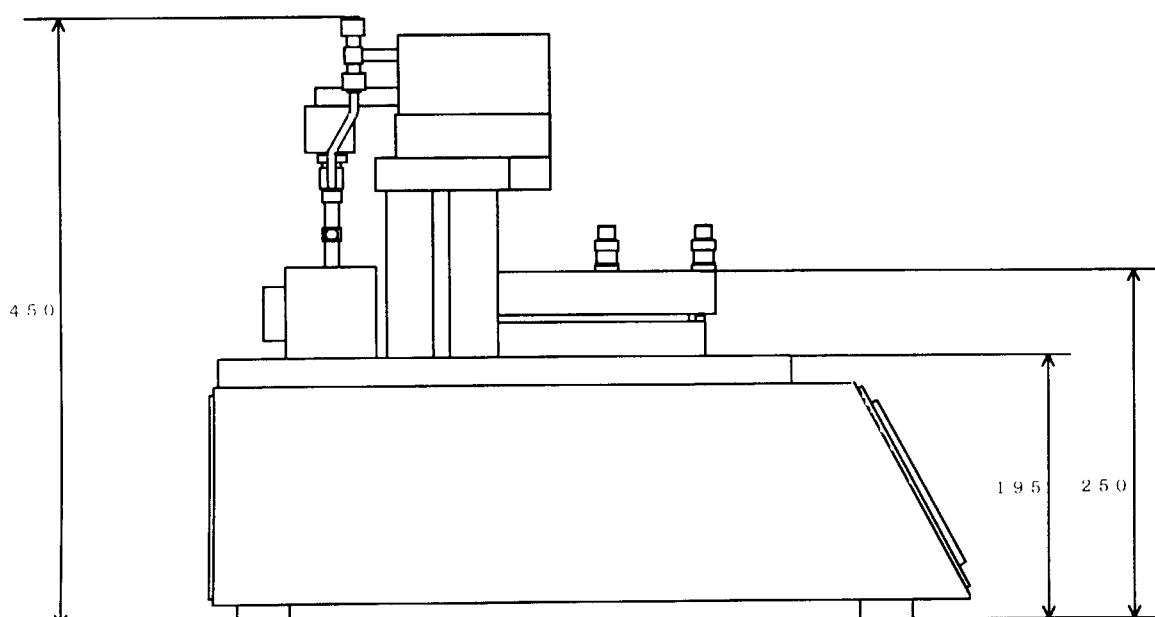
- ・自動的に20個のグラファイト試料がプログラムどおりにプレスできる。
- ・段階的にプレス速度、プレス圧(1~700lb)及びプレス保持時間(0.1~5.0sec)を任意に設定できる。
- ・プレススピードは0.07~1.00mm/secで任意設定できる。
- ・実際にかかったプレス圧が表示できる。
- ・プレスした結果をRS232Cの端子から外部コンピュータに出力できる。
- ・プレスするときにグラファイト試料が他の試料から汚染しない。

のことにより、短時間に効率よく、プレスむらのない測定試料を数多く作製することができる。

図 5-2 SF<sub>6</sub>回収装置の配管系統図



上面図



側面図

(寸法単位 : mm)

図 5 3 ターゲットプレス機

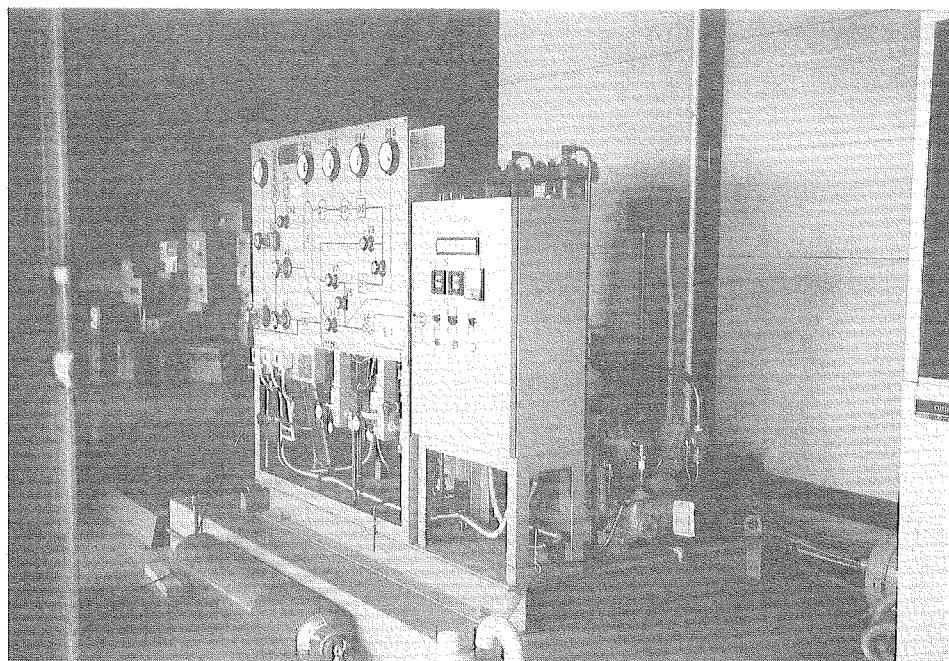


写真 13 SF<sub>6</sub>回収装置全体

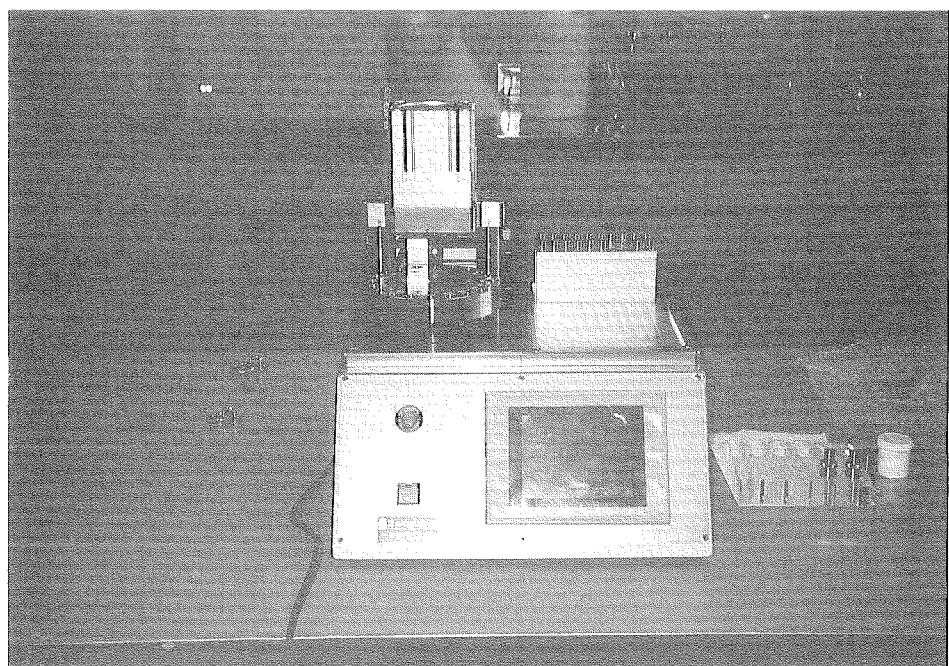


写真 14 ターゲットプレス機

## 7. おわりに

1997年4月にタンデトロンを日本原子力研究所むつ事業所に設置した。現在までに、炭素ラインについてはすべての調整と測定精度の確認を完了し、海水試料の測定を開始した。一方、ヨウ素ラインについては重イオン検出器による測定精度の確認を終了し、最終段階である飛行時間型検出器による測定精度の確認のための調整を行っている。

当研究室では、日本近海における海水及び物質循環の機構を解明する調査・研究にタンデトロンを利用する準備を進めた。 $^{14}\text{C}$ については、海水における炭素の同位体比の相違から、対象海域において目的とする水塊の拡散・混合の度合やその移流を解明するとともに、水塊そのものの滞留時間を見積もるといった海水循環に関する調査・研究を行い、海水循環モデルの構築に使用する計画である。

また $^{129}\text{I}$ については、再処理施設等から放出される人工的な $^{129}\text{I}$ がどのように海洋を移行するのか、あるいは、海洋における $^{129}\text{I}$ の鉛直分布がどのようになるか、またその時の $^{129}\text{I}$ はいかなる化学形態で存在するかについて調査・研究し、この成果に基づいて物質移行モデルの構築や $^{129}\text{I}$ の環境影響評価に役立てる予定である。

タンデトロンは、現在、日本原子力研究所以外の機関には、受託調査及び共同研究という2通りの形式で利用されている。今後、地球科学、環境科学、宇宙科学、水理学、考古学など幅広い分野での利用が期待される。

### 謝辞

本報告をまとめるにあたり、ご助言、ご理解及びご鞭撻をいただいた酒井陽之施設部長に深く感謝いたします。さらに、図面及び表の作製などに協力していただいた（財）日本海洋科学振興財団の須藤一彦氏に感謝致します。

### 参考文献

- 1) 水島俊彦、郡司勝文、荒巻能史、山本忠利：原研・むつタンデトロン加速器分析施設の現状；加速器質量分析シンポジウム報告集、12-14 (1997)
- 2) 荒巻能史、久慈智幸、水島俊彦、山本忠利：原研・むつAMSの研究計画について；加速器質量分析シンポジウム報告集、93-98 (1997)
- 3) A. Gottdang : Report about the acceptance measurements of  $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ -ratios,  
Private Communication
- 4) 荒巻能史：AMSによる海水中の放射性炭素測定のための化学的前処理法；JAERI-Research  
(1999)
- 5) T. Aramaki, T. Mizushima, Y. Mizutani, T. Yamamoto, O. Togawa, S. Kabuto, T. Kuji,  
A. Gottdang, M. Klein and D. J. W. Mous (2000) : The AMS facility at the Japan Atomic  
Energy Research Institute (JAERI). Nucl. Instrum. Methods B, in press.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC開発理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								= 4.184 J(熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>			
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>			
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>			
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>			
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>			
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>	1	0.01	100	1	1	3876	1	100	1	
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1		0.01	1		2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1		0.01	1	

(86年12月26日現在)

タンデム型加速器質量分析装置の整備