

図2に蓄積されるイオンビームの生存する割合と真空度の関係を示した[5]。サイクロトロンからの N^{5+} (10 MeV/u) ビームを入射する場合、その生存率を高めるには 1×10^{-10} Torr 以下の超高真空が要求される。

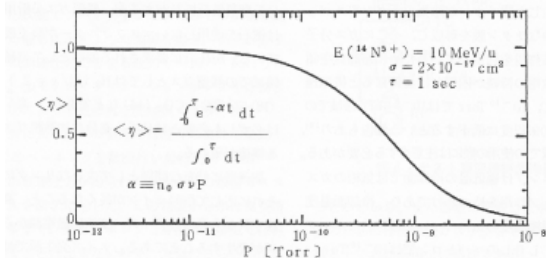


図2：イオンビームの生存する割合と真空度

課題は加速器真空槽の1部分に相当する大きさのテストチャンバーを作り、実際に 10^{-11} Torrの真空にすることであった。そのために、以下の項目を検討した。

- 1) 材質の選定：SUS316L、アルミニウム、
- 2) ポンプの選定：イオンポンプ、チタンゲッターポンプ、ターボ分子ポンプ、ソーブションポンプ、油拡散ポンプ、
- 3) フランジガスケットの選定：銅ガスケットのコンフラットフランジ、メタル O-リングガスケット、アルミフオイル、
- 4) 脱ガス方式の選定：電熱線による加熱脱ガス、直接通電による加熱脱ガス、放電洗浄による脱ガス、その結果、次の方針で進めた。

- 1) チャンバーは高温加熱脱ガスが可能な金属、及びセラミック製にし、有機物は一切使用しない。
- 2) ポンプはイオンポンプ、チタンゲッターポンプ、ターボ分子ポンプを採用し、ソーブションポンプ、油拡散ポンプは使用しないこととした。

3.1 テストスタンド1

真空チャンバーは直径300mm、長さ2000mmのステンレス鋼(SUS316L)のパイプで、X線による溶接部のブローホールの点検をした。両端にはアルミフオイルガスケット用フランジを付け、それに真空ポンプ、真空計取り付け用の銅ガスケット用コンフラットフランジの枝管を取り付けた。

内部は水洗、脱脂のためフロンによる内面の超音波洗浄を行い、チタンゲッターポンプとターボ分子ポンプにオールメタルバルブを組み合わせた排気系で排気した。吸着ガスの焼き出しにはチャンバーにヒーターを取り付け、保温材としてグラスウールを使用した。この断熱と絶縁に優れたグラスウールによる保温は本番のTARN1、TARN2にも採用した。

真空度は全圧をB-Aゲージ、分圧を四重極質量分析計を用いて測定した。

テスト結果は24時間400℃のベーキングを行い、チタンゲッターポンプ(液体窒素温度)と分子ポンプで排気して、最終的に 2×10^{-11} Torrの真空度を得た[5]。

3.2 テストスタンド2

次にTARN1の偏向電磁石部の真空槽に模したテストスタンド2を試作した。この模式図を図3に示した。排気

はイオンポンプとターボ分子ポンプの組み合わせで実施した。電磁石部のチャンバーは直接通電方式で加熱した。これは真空槽内壁に付着しているガスを除くため、アルゴンガスを導入して放電させる放電洗浄である。このベーキングと放電洗浄により、 3×10^{-11} Torrの真空度を実現した[6]。

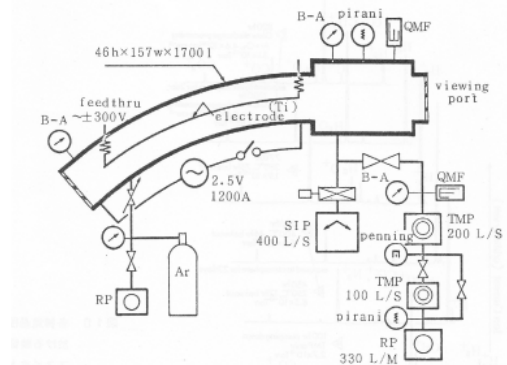


図3：直接通電と放電洗浄テスト模式図

4. TARN 1

各グループの準備研究を基礎に周長32mのTARN1が建設された。SFサイクロトロンとビーム輸送系及びTARN1を図4に示した。表2にその諸元を示した。

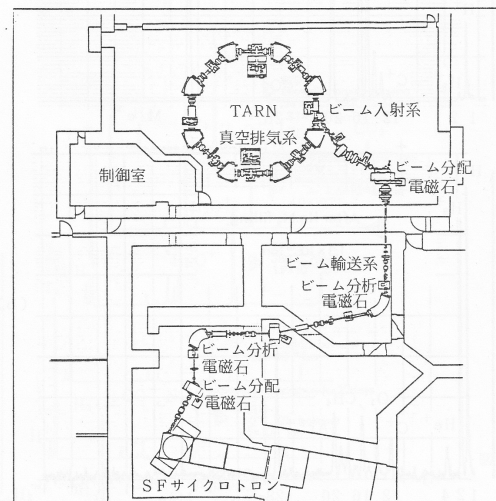


図4：SFサイクロトロンとTARN1

表2 TARN1の諸元

Repetition Rate	1 Hz
Average Radius	$R = 5.06 \text{ m}$
Radius of Curvature	$\rho = 1.333 \text{ m}$
Circumference	$C = 31.795 \text{ m}$
Length of a Unit Cell	$L_{\text{cell}} = 3.974 \text{ m}$
Length of a Long Straight Section	$L_{\text{lst}} = 1.8 \text{ m}$
Number of Unit Cells	$N_{\text{cell}} = 8$
Superperiodicity	$N_s = 8$
Structure of a Unit Cell	FODO

リングは8か所の偏向電磁石部と直線部から成る。直線部には四重極電磁石、ビーム入射装置、高周波加速空洞、確率冷却用のピックアップとキッカー、バンプ電磁石部のセラミックチャンバーおよび各種モニター類が設置されている。真空槽はSUS316Lとセラミックで製作し、シールはコンフラットフランジ用の銅ガスケットと銀メッキをした金属O-リングを使用した。この特徴は300℃まで高温脱ガス可能なシステムである。

リングの1/8部分の真空槽を図5に示した。加熱脱ガスのために直線部は抵抗線を巻き、偏向電磁石部は約1000Aを通す直接通電方式で加熱した。保温のために20mm厚のグラスウールをまいて加熱効率を高めている。

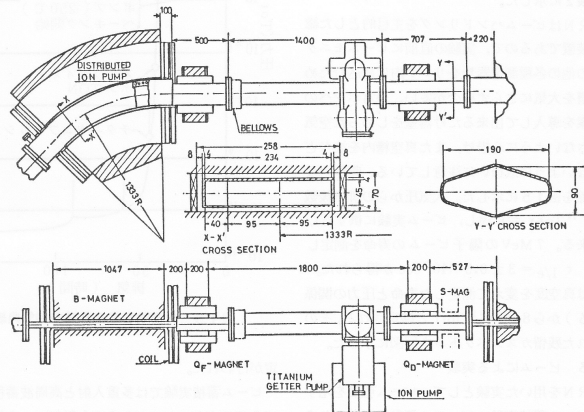


図5：TARN 1の真空槽

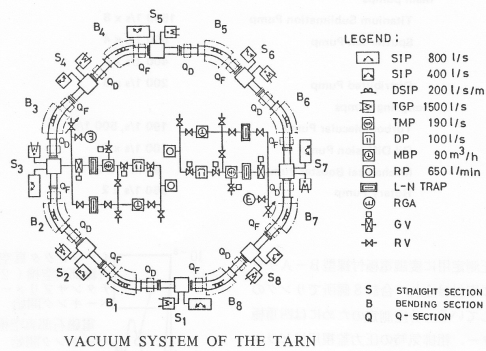


図6：TARN 1の真空系

図6に真空系全体の構成を示した。ポンプはイオンポンプ、チタンゲッターポンプ、ターボ分子ポンプを使用した。特に、大気圧からの粗排気時間を減じ粘性流から分子流に移る領域での油の逆流を避けるために、メカニカルブースターポンプを用いた。

典型的な排気曲線を図7に示した[6]。排気には大気圧からの排気、リークテスト、ベーキング、リークテスト、イオンポンプ作動、チタンの蒸発等があり、全過程で約100時間後には 10^{-11} Torrに達した。

TARN1では超高真空の下で確率冷却実験が実施され、成功した。その写真を図8に示した[7]。SFサイクロトロンから28MeVのアルファ粒子を入射し、約400秒の冷却時間で初期運動量幅が1%から0.06%まで減少した。

5. TARN 2

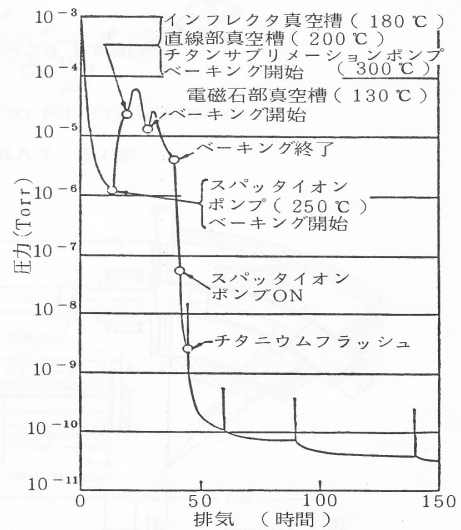


図7：TARN 1の排気曲線

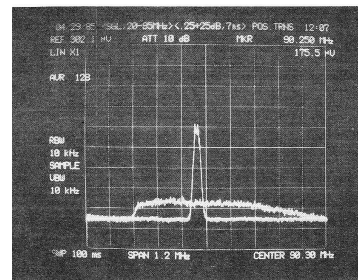


図8：28 MeV アルファ粒子の確率冷却



図9：TARN 1の写真

TARN 1における超高真空の実現、確率冷却、多重入射などの実験目的を達成後、TARN 1は解体された。図9に解体前の写真を示した。それを基礎に、電子冷却、ビーム加速、ビーム取り出し、などの実験を目的として、周長78mのTARN2の建設が開始された[8]。

図10にTARN 2の真空系を示した。リングは六回対称で長直線部は6箇所ある。真空槽は2個の偏向電磁石部を一体の真空槽で作る形とした[9]。ビーム加速では繰り返しが0.1Hzなので偏向電磁石部の真空槽はTARN1と同じSUS316Lを用い、4mm厚とした。

真空系の設計思想は基本的にTARN1と同じである。ポンプはTARN 1に使用していたイオンポンプ、チタンゲッターポンプにポンプを増強して取り付けた。表3にポンプと総排気速度を示した。

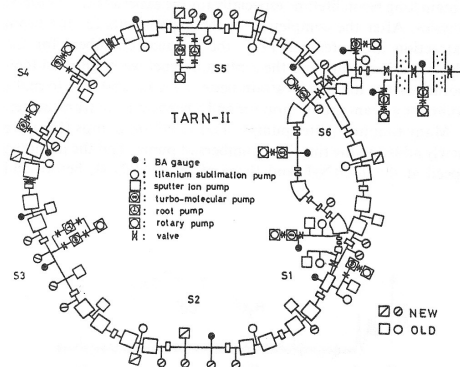


図10: TARN 2の真空系

表3: TARN 2の真空ポンプ

	TARN-II		
	TARN-I	Before	After
TGP	1500 l s ⁻¹ × 8	1500 l s ⁻¹ × 7	1500 l s ⁻¹ × 8 1000 l s ⁻¹ × 3 700 l s ⁻¹ × 4 400 l s ⁻¹ × 11
Ip	800 l s ⁻¹ × 4 400 l s ⁻¹ × 4	800 l s ⁻¹ × 5 400 l s ⁻¹ × 3 160 l s ⁻¹ × 2	800 l s ⁻¹ × 6 400 l s ⁻¹ × 5 160 l s ⁻¹ × 6
Total pump speed	16,800 l s ⁻¹	16,000 l s ⁻¹	30,000 l s ⁻¹

真空系は組み立て後、排気、ベーキングを実施し、イオンビーム実験に必要な真空度を得た。ビームを入射して測定した真空度と寿命を表4に示した[10]。

表4: 各種イオンの真空度とビーム寿命

Ion	Energy (MeV)	Mean pressure (torr)	Lifetime (s)
P	20	2.2 × 10 ⁻⁹	12
H ₃ ⁺	20	2.0 × 10 ⁻⁹	0.1
H ₂ ⁺	13	1.2 × 10 ⁻¹⁰	0.8
³ He ⁺	13	5.4 × 10 ⁻¹⁰	0.7
⁴ He ²⁺	40	1.3 × 10 ⁻¹⁰	400
	40	2.1 × 10 ⁻¹⁰	110
	40	3.2 × 10 ⁻¹⁰	100
HD ₂ ⁺	9.5	1.2 × 10 ⁻¹⁰	1.1
HeH ⁺	9.5	1.2 × 10 ⁻¹⁰	1.3
¹⁴ N ⁵⁺	85	1.4 × 10 ⁻¹⁰	12
¹⁴ N ⁷⁺	85	1.9 × 10 ⁻¹⁰	40
	85	3.6 × 10 ⁻¹⁰	35
	85	1.0 × 10 ⁻⁹	18

1994年にTARN 2は電子冷却ビームを用いた原子物理の実験に専用することになり、ビーム取り出し用の静電セプタムとセプタムマグネットは真空槽の外に取り出された。新たに超伝導磁気を利用した微弱電流測定装置、パーマロイモニターが設置された。同時に真空系は真空度向上を目指し、真空槽外部から加熱するタイプの非蒸発型NEGポンプで強化した[11]。

図11に20 MeV陽子の電子冷却の写真を示した。SFサイクロトロンから20 MeVの陽子を入射し約5秒でビームの運動量巾が10⁻³から10⁻⁴に改善されている。図12にTARN 2の入射部付近、図13に電子冷却装置の写真を示した。

図14にTARN 2の真空度の推移を示した[12]。図中、

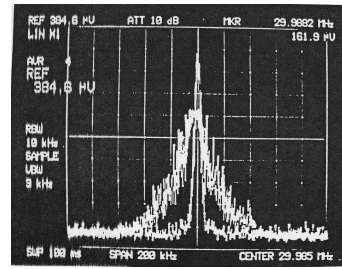


図11: 20 MeV陽子の電子冷却



図12: TARN 2入射部付近

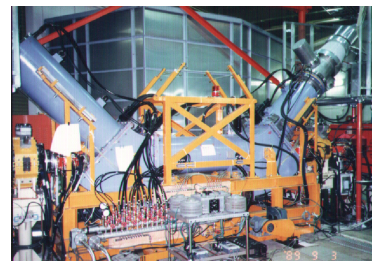


図13 電子冷却装置

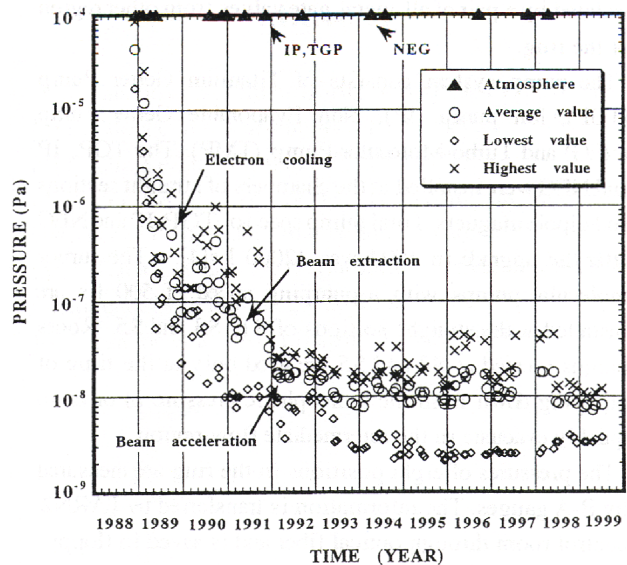


図14: TARN 2真空度の向上

上部の黒色▲は大気に曝した時で長矢印はそれぞれ電子冷却[13]、ビーム取り出し[14]、ビーム加速が成功した時点を示す。真空度の向上と共にさまざまなビーム物理実験が成功裏に進行した。

6. 静電蓄積リング

原子核研究所の改組にともない高エネルギー加速器研究機構が発足し研究基盤はつくば地区に移された。そこでは田辺徹美教授の下で生体分子イオンを蓄積する静電蓄積リングの設置、真空度の改善が進められた[15],[16]。



図15：静電蓄積リング

図15に静電蓄積リングの写真を示した。これは4m×1mのレーストラック型で周長8mの電場のみを使用するリングである。特に生体分子イオンを蓄積するため、真空に対する要求は厳しく 10^{-11} Torrの超高真空が要求される。

真空槽はSUS316LNのパイプで中には偏向用の静電デフレクター、収束用静電四重極電極、位置モニター等が組み込まれる。真空槽は溶接加工後に真空炉中で950°Cの加熱脱ガスを実施した。ポンプは100l/sのイオンポンプ4台、1000l/sのチタンゲッターポンプ6台である。リングの真空計はB-Aゲージとエキストラクターゲージを用いた。

イオンはリング上流約9mの位置に設置されたECRイオン源から入射される。そこからリングまでの運動量分析用電磁石を含む輸送系には3か所に20mm×20mmのオリフィスを設けイオン源からのガス負荷を順次低減した。その間はターボ分子ポンプ、チタンゲッターポンプ、イオンポンプ、クライオポンプを用いて排気した[17]。

リングの真空槽はシースヒーターで加熱され、熱電対で温度を検出しながら調節した。リングは最高300°Cで11日間の加熱脱ガス排気により 3×10^{-11} Torrの真空度に到達した[16]。

その後ECRイオン源の上流に生体分子イオンを生成するためのエレクトロスプレーイオン源と静電分析器を設置し、高質量生体分子イオン蓄積実験は開始された。

7. まとめ

初期に安定同位体分離器の建設を進め、完成後保守運転に携わり全国の核物理研究者にターゲット用の同位体を供した。ニューマトロン計画の真空グループに移ってからは準備研究に続き、TARN1では 10^{-11} Torr領域の超高真空を実現し、確率冷却実験を成功させた。

TARN2では 10^{-10} Torrから 10^{-11} Torr領域でビーム加速、ビーム取り出し、電子冷却実験を成功させ、分子物理の研究を支援した。つくば地区への移転後は静電蓄積リングの設置、その真空系の保守を行い 10^{-11} Torr領域の超高真空を維持して生体分子イオンの研究を可能にした。

この一連の仕事の成功には超高真空が不可欠であり、この実現のために我々が選んだ方針はガス放出率を下げ

るために可能な限り高温度のベーキングを実施することであった。

8. 謝辞

坂井光夫、金子桑太郎先生には同位体分離器の建設、共同利用でご指導頂きました。荒谷美智、水谷道雄、菅井勲、岩田克彦、大城幸光、瀧好秀氏の同位体室各氏には共同利用でご尽力をいただきました。

平尾泰男先生にはニューマトロン計画に参加する機会を作って頂きました。片山武司、山田聡、野田章、服部俊幸、渡辺伸一のニューマトロン準備室のメンバーや放医研の野田耕司氏には一緒に仕事をすることで色々とお教えられました。

真空グループのリーダー溝渕明先生には測定の厳しさについて教えられました。吉沢盛男、新垣良次氏には真空計の記録に関してお世話になりました。

田辺徹美氏の電子冷却ビームを用いた実験では古いペンレコーダーを使い世界で初めて見るピークを測定していた姿を思い出します。一連の研究に参加させてもらったことを記して、関係された皆様に感謝いたします。

文献

- [1] 核研20年史、西東京市資料室所蔵資料、K E K資料室所蔵資料。
- [2] 坂井光夫、INS-TL 17 (1955), INS-TL 19 (1955), INS-TL 24 (1955). 坂井光夫、質量分析、No14,p27(1960). K.Kaneko, INS-J- 92 (1965). K.Kaneko, INS-J -145 (1974). K.Chida, Mass Spectroscopy, 19 pp49-74 (1971).
- [3] Y.Yoshizawa, N.I.M, 134 pp93-100 (1976).
- [4] Y.Hirao, INS-NUMA-5, August 1977. ニューマトロン通信No.1 1980.
- [5] 溝渕 明、真空、第22巻第6号p213 (1979).
- [6] 千田勝久、加速器科学、第2巻第2号 p55 (1987).
- [7] 片山武司、日本物理学会誌第38巻第6号p481(1983). 「重イオン蓄積リング」研究の経緯と成果 東大原子核研究所 (1985).
- [8] A.Mizobuchi, 6th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tokyo, p42 (1987).
- [9] K.Chida, 7th Symposium on Accelerator Science and Technology, Osaka, p139 (1989).
- [10] K.Chida, 9th Symposium on Accelerator Science and Technology, Tukuba, p181 (1993). K.Chida, Vacuum, 44, 539 (1993)
- [11] K.Chida, 11th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hyogo, p365 (1997)
- [12] K.Chida, 12th Symposium on Accelerator Science and Technology, Saitama, p287(1999)
- [13] T.Tanabe, N.I.M, A307 7 (1991).
- [14] M.Tomizawa, N.I.M, A326 399 (1993)
- [15] T.Tanabe, 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna,,June(2000)
- [16] 田辺徹美、卓上シンクロトロンによる分子科学の研究 平成11年度—平成13年度科学研究費補助金 基盤研究(A)(2)研究成果報告書。
- [17] 千田勝久、真空、 Vol.44,No.3,p237 (2001).