# ESTABLISHMENT OF ULTRAHIGH VACUUM TECHNIQUE AT HEAVY ION ACCELERATORS

Katsuhisa Chida<sup>1</sup>

#### Abstract

Ultrahigh vacuum techniques for heavy ion cooler/storage-rings, the TARN (Test Accumulation Ring for Numatron project)1, the TARN2 and the Electrostatic Storage Ring are described. These rings had been maintained at a vacuum pressure of the order of 10<sup>-11</sup>Torr for the experiments of stochastic cooling, electron cooling and high mass molecular ion storage.

# 重イオン加速器における超高真空技術の確立

#### 1. 核研黎明期

1953年学術会議は政府に大型加速器の建設を勧告 し東京大学に設置することが決まった。設置場所の田無 町の住民からは原爆の研究をするのではないかと懸念さ れ反対運動がおこった。朝永振一郎原子核特別委員会委 員長、菊池正士核研初代所長、熊谷寛夫教授らは田無町 の町長、議会議長宛に原子核研究者の総意として、次の ような見解を表明した[1]。

「原子核研究所に関する原子核物理学者の基本的態度」

私達は研究を遂行する義務と責任を持って居り、原子 核研究所をその本来の目的に従って設立する必要性を痛 感する。そして現在の所その研究所を学術会議の原則に もとづいて建設するという私達の既定の方針を変更せね ばならぬとは考えないが、将来この目的が外部からの圧 力等によってゆがめられぬかどうか、またその原則が果 して守りぬけるかどうかという田無町民を始めとする国 民の深く危惧するところについては、私達も安易に楽観 しているのでなく、同感しかつ重大な責任を感ずるので そのような事態の生まれた場合には私達一同は国民と共 に職をとしても斗う決意である。

\*原子核研究所の目的は原子核物理学の基礎研究であっ て原子力の研究を含まない。

1955年東京大学附置として原子核研究所が設立さ れた。1956年に坂井光夫教授の下で同位体分離器の 建設が進められた。当時は研究棟の完成前で同位体分離 器が設置される予定の部屋に雑居して、佐々木寛さん達 がモンロー計算機で計算をしていた。熊谷寛夫先生は若 い技術員に電磁気学の講義を1年ほど続けられた。研究 者と若い技術者が一体となり希望に燃え建設を進めた。

### 2. 同位体分離器

図1に分離器の写真を示した。同位体分離器は偏向角 60度、軌道半径900mm、電磁石重量17トンであ る。完成後は金子粂太郎先生の運営で共同利用研究者に 様々な分離同位体を供給してきた。ハロゲン化合物等の 適当なイオン源物質を選ぶことにより多数の元素のイオ ンを生成することで鉛に至る元素の同位体分離を行った [2]。表1に分離した元素を示した。



図1:安定同位体分離器

表1:核研同位体分離器で分離した元素

2He, 3Li, 4Be, 5B, 6C, 7N, 8O, 10Ne, 11Na, 12Mg, 14Si, 15P, 16S, 17Cl, 18Ar, 24Cr, 25Mn, 26Fe, 30Zn, 32Ge, 34Se, 36Kr, 38Sr, 40Zr, 47Ag, 48Cd, 49In, 50Sn, 51Sb, 52Te, 54Xe, 60Nd, 62Sm, 72Hf, 74W, 76Os, 82Pb

SFサイクロトロン完成後はオンライン放射性同位体分離器を設置しZnを分離する研究に発展した[3]。これらの イオンビームの通路は10<sup>-6</sup>Torrの真空度であった。

## 3. ニューマトロン準備研究

1976年高エネルギー重イオン加速器計画— NUMATRON Projectが発足し、平尾泰男教授の下に基礎的 データ集積を目的としたテストリングーTARN(Test Accumulation Ring for the NUMATRON Project)の建設のた めの準備研究が開始された[4]。溝渕明教授の真空グルー プでは重イオン蓄積リングに必要な超高真空を実現する ための予備実験を開始した[5]。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> E-mail: k-chida@mrj.biglobe.ne.jp

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<sup>5+</sup>(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<sup>-10</sup>Torr 以下の超高真空が要求される。



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<sup>-11</sup>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、
- 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、ソープションポンプ、 油拡散ポンプ、
- 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、
- 税ガス方式の選定: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。

 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、ソープションポンプ、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<sup>-11</sup>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<sup>-11</sup>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TARN 1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

-		and of the state o
	Repetition Rate	1 Hz
	Average Radius	R = 5.06 m
	Radius of Curvature	$\rho = 1.333 \text{ m}$
	Circumference	C = 31.795 m
	Length of a Unit Cell	$L_{cell} = 3.974 \text{ m}$
	Length of a Long Straight Section	$L_{1st} = 1.8 \text{ m}$
	Number of Unit Cells	$N_{cell} = 8$
	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 胴、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 メッキをしたメタル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:TARN1の真空槽



図6:TARN1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<sup>-11</sup>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8:28 MeV アルファ粒子の確率冷却



図9:TARN1の写真

TARN1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、TARN1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TARN2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TARN1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。



表3: TARN2の真空ポンプ

		TARN-II	
	TARN-I	Before	After
TGP	$1500 \ 1 \ s^{-1} \times 8$	$1500 \ 1 \ s^{-1} \times 7$	$\begin{array}{c} 1500\ 1\ s^{-1} \times 8\\ 1000\ 1\ s^{-1} \times 3\\ 700\ 1\ s^{-1} \times 4\\ 400\ 1\ s^{-1} \times 11 \end{array}$
Ip	$\begin{array}{c} 800 \ 1 \ s^{-1} \times 4 \\ 400 \ 1 \ s^{-1} \times 4 \end{array}$	$\begin{array}{c} 800\ 1\ s^{-1} \times 5 \\ 400\ 1\ s^{-1} \times 3 \\ 160\ 1\ s^{-1} \times 2 \end{array}$	$\begin{array}{c} 800\ 1\ s^{-1} \times 6 \\ 400\ 1\ s^{-1} \times 5 \\ 160\ 1\ s^{-1} \times 6 \end{array}$
Total pump speed	16,800 l s <sup>-1</sup>	16,000 l s <sup>-1</sup>	30,000 l s <sup>-1</sup>

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

T	Energy	Mean pressure	Lifetime
Ion	(MeV)	(torr)	(s)
р	20	$2.2 \times 10^{-9}$	12
$H_2^+$	20	$2.0 \times 10^{-9}$	0.1
$H_3^+$	13	$1.2 \times 10^{-10}$	0.8
<sup>3</sup> He <sup>+</sup>	13	$5.4 \times 10^{-10}$	0.7
<sup>4</sup> He <sup>2+</sup>	40	$1.3 \times 10^{-10}$	400
	40	$2.1 \times 10^{-10}$	110
	40	$3.2 \times 10^{-10}$	100
$HD_2^+$	9.5	$1.2 \times 10^{-10}$	1.1
HeH+	9.5	$1.2 \times 10^{-10}$	1.3
$^{14}N^{5+}$	85	$1.4 \times 10^{-10}$	12
$14N^{7+}$	85	$1.9 \times 10^{-10}$	40
	85	$3.6 \times 10^{-10}$	35
	85	$1.0 \times 10^{-9}$	18

1994年にTARN2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<sup>-3</sup> から10<sup>-4</sup> に改善されている。図12に TARN2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TARN2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:TARN2入射部付近



図13 電子冷却装置



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<sup>-11</sup>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℃の加 熱脱ガスを実施した。ポンプは100//sのイオンポンプ4 台,1000//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℃で 11日間の加熱脱ガス排気により3×10<sup>-11</sup>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<sup>-11</sup>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<sup>-10</sup>Torr から10<sup>-11</sup>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<sup>-11</sup>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、金子粂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、渕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中で色々と教え 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、

- KEK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 Europian 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年度一平成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).