超高真空機器へのアルミニウム合金の適用

石 丸 肇*

1. は じ め に

筑波研究学園都市にある文部省・高エネルギー物理学研究所で建設中の、電子と陽電子とを衝突させる型の加速器で、世界最高のエネルギーを持つトリスタン・リング⁽¹⁾ (直径約1キロメートル、加速後の電子・陽電子のエネルギーはそれぞれ30 GeV†(図1))に関連して、世界で初めてすべてアルミニウム合金の超高真空装置が開発された⁽²⁾。これまで知られていたアルミニウムとその合金の諸々の点に2つの発見、(1)アルミニウムとその合金は放射化されにくく放射化されても減衰が極めて

早い、(2)材料と表面をコントロールすることによって極めて低い放出ガス率となる、を加えることによって、ほとんどの点で従来のステンレス鋼システムより優れていることが認められた。これによってアルミニウムとその合金は急速に各分野への応用がなされている。

2. アルミニウム合金化のきっかけ ——誘導放射能——

1974年頃までは真空機器はほとんどステンレス鋼で作られていた。ところが米国・西ドイツで電子貯蔵加速器の真空ビームダクトにアルミニウム合金を採用していた。その理由は加速された電子ビームに伴って発生する強力なシンクロトン放射光の熱負荷に耐えることであった。しかし真空ビームダクト以外のフランジ・ベローズ・真空端子・ポンプ・ゲージなどは従来のステンレス

図1 トリスタンのレイアウト。(1) 電子・陽電子衝突ビームリング、(2) 電子・陽電子衝突実験室、(3) 入射蓄積リング、(4) 電子線型加速器、(5) 陽電子発生用線型加速器、(6) 放射光実験施設、(7) 陽子シンクロトン。

* 高エネルギー物理学研究所助教授
Aluminum Alloy Materials for Ultrahigh Vacuum System: Hajime Ishimaru (National Lab. for High Energy Physics, Tsukuba, Ibaraki)
Keywords: aluminum alloy, extrusion, ultrahigh vacuum, storage, accelerator, low residual radioactivity
1984年4月20日受理

図2 8 GeV 陽子ビーム損失による金属の誘導放射能の減衰。文献(3)より転載。

† 1 eV $\doteq$ 1.6 $\times$ 10⁻¹⁹ J

鋼を用いていた。従ってアルミニウム合金とステンレス鋼の接合技術が最も重要であった。

一方、1977 年頃、筆者は高エネルギー研陽子加速器のビーム計測の仕事に携わっており、ステンレス製の真空ビームダクトに組込まれた検出器を交換する際に高エネルギービームの損失に伴って生じる誘導放射能に悩まされていた。誘導放射能のより低い金属があるのではないかと素朴に考え、身近にある 5 種の金属をビーム損失の大きな位置に置いて、ビーム停止後の放射能の減衰を測定した⁽³⁾(図 2)。その結果アルミニウムだけが桁違いに早く減衰することに気づいたのである。真空装置をアルミニウム合金化すれば放射能被曝を低減出来ると考え、まず米国・西ドイツのアルミニウムとステンレス鋼の接合方式を検討した。作業の集中するフランジがステンレス鋼では放射能被曝を低減するうえで意味がないと考え、まずフランジのアルミニウム合金化から研究開発を始めた。

3. ガス放出率

粒子加速器の長尺の真空ビームダクトを想定してアルミニウム合金のパイプとメタルシールのアルミニウム合金のフランジを完成させ、その超高真空特性を調べた。その際、超高真空特性の基礎となるガス放出率と到達圧を調べるためにバルブ、ポンプ、真空ゲージなどを必要とするが、これらの真空部品は従来のステンレス鋼を利用していた。ところがアルミ合金とステンレス鋼によって作られた真空構成部品を混ざって使うと、システムに必要な加熱脱ガス処理の温度に問題があることが分かった。すなわちアルミニウム合金の脱ガス処理は耐熱性の上限の約 423 K (150°C) に制限され、その結果ステンレス鋼の真空部品の加熱脱ガス処理が十分でなく、ステンレス鋼で作られた真空部品のガス放出がシステムの到達圧を制限するという不都合が生ずるのである。そこでバルブ、ポンプ、真空ゲージなどの真空部品もアルミ合金化する決心をした。

まずイオンポンプのアルミニウム合金化を図る事とし、市販のイオンポンプの電極をアルミニウム合金のポンプケースに組み込みイオンポンプとして動作させた。ところが到達圧は徹底的に加熱脱ガス処理したにも拘わらず 10^{-5} Pa†程度にしかならず、目標の 10^{-8} Pa に程遠いものであった。その原因は板材から溶接構造によって作られたポンプケースの内表面の水酸化変質層に含まれている水分、油分の汚れであることをつきとめた。そこでイオンポンプケースを押し出し型材によって作ることを検討してみたが通常の押し出し工程でも高温のアルミニウム合金管が先端部が開放のまま大気中に押し出され、水蒸

気で熱処理されるためアルミニウム合金管の内表面には厚い水酸化変質層が生成されることが判明した。この層はポーラスで汚れを吸蔵しやすいので、その生成を防ぐため図 3 に示される特殊押し出し法を開発した⁽⁴⁾。特殊押し出し法は押し出されたアルミニウム合金管の先端を密封し内部に Ar+O₂ の混合ガスを満たしながら押し出しを続け後端を再び密封するものである。押し出し工程の後の矯正、調質も Ar+O₂ の混合ガスを満たした密封状態で行なう。こうすることによってアルミニウム合金管の内表面に図 4 に示すごとく緻密で薄い酸化層が形成される。

特殊押し出し法によって製造されたアルミニウム合金管のガス放出特性をスルーブット法によって調べた。結果は初期排気後 86.4 ks (24 h) で 1.3×10^{-8} Pa·m/s (10^{-11} Torr·L/s·cm²)、引続き 423 K (150°C) 86.4 ks の加熱脱ガス処理を行い、加熱停止後 86.4 ks で 2.6×10^{-10} Pa·m/s (2×10^{-13} Torr·L/s·cm²)⁽⁵⁾ と極めて少ないガス放出率となり、これは従来のステンレス鋼のそれを 1 桁以上改善する値となった。

図3 Ar+O₂ ガスで内部を満たした状態で押し出す特殊押し出し法。(1) アルミニウム合金管、(2) 密封、(3) Ar+O₂ ガス、(4) ポートホールダイス、(5) ビレット、(6) ガスボンベ。

図4 特殊押し出しによる緻密で薄い酸化層の電子顕微鏡による断面写真。表面の黒いのは酸化層の保護のための金の蒸着層。
(注) 写真提供: 昭和アルミニウム株式会社

4. トリスタン計画とそれを構成する超高真空系のアルミニウム合金化

この間にトリスタン計画のスタートが間近となり超大

† 1 Pa = 0.75×10^{-2} Torr

型電子・陽電子衝突リングの真空システムの基本設計の背景には比較的狭い敷地で世界最高エネルギーとしなければならない、そのために電磁石と電磁石の間の直線部を最少とする、限られた予算の枠で高性能、維持容易なものを作る、少ないスタッフと短い期間で建設する、という要請があった。この要請を実現するために、(1)偏向マグネットや四極マグネットの真空ビームダクトをアルミニウム合金の特殊押出法によって製作し、それらの接続にはアルミニウム合金の非円型ベローズを介してフランジを用いず現地自動溶接で接合する、(2)ポンプ、バルブ、真空ゲージなどすべての真空部品をアルミニウム合金化して小型・軽量・単純・規格化するという2つの大方針をたてた⁽⁶⁾。とりわけ要求仕様を満たす超高真空部品の開発には限られた予算と納期で安定した商品として契約・購入しなければならないことを考慮した。当然のことながら市販のステンレス鋼で作られた超高真空部品を利用出来ず、すべて高エネルギー物理学研究所の責任においてメーカーの協力を得て開発することとなった。

5. 新開発のアルミニウム合金超高真空システム

(1) フランジ継手

アルミニウム合金フランジ継手(図5)は従来のステンレス鋼のコンフラットフランジと組合せて使え互換性がある。フランジはコンフラットフランジとほぼ同一形状・寸法であるが、気密シール部、溶接接続部に工夫がある。すなわち気密シールのナイフエッジは先端に丸みを持たせ立上りを傾けた。

図5 アルミニウム合金フランジ継手(mm)。

(1) アルミニウム管, (2) フランジ, (3) AC-TIG 溶接, (4) ガasket, (5) ナイフエッジ, (6) ボルト・ナット・ワッシャ, (7) ベローズ, (8) ヘリコフレックス, (9) ステンレス鋼フランジ。

また、気密シール部分はダイヤモンドバイトによる超鏡面とし、スクラッチ傷が原因となる真空漏れ、および高温締付けによるガスケットの接着を防止するためのイオンプレATING法によるCrNのコーティング処理を行っている。その膜厚は約2μmで膜の硬度はHv~1200(10g)が得られている。フランジの材料はアルミニウム合金では最高的高温強度を持つ2219-T87とした。この合金は調質によって良好な機械的特性を得ているので溶接の熱影響で調質が損われることがある。溶接タイプのフランジには図6に示すように一体構造でパイプをつけ溶接の熱影響を防いでいる。ガスケットはアルミニウム1050-H18の磨き板材からプレス法で製作したものをを用いる。ボルトは2024-T4材にアルマイト処理、ナットは6061-T6材を、ワッシャは2017-T3材にハードアルマイト処理したものを用いる。ボルト・ナット・ワッシャの組合せを脱脂状態で約50回のくり返し締め付けに対し、一定締め付けトルクで一定の軸力を発生する。熱サイクルの厳しい場合やステンレス鋼フランジとの組合せの場合はヘリコフレックス†を用いている。

図6 フランジの溶接開先と熱影響による硬度の減少(mm)。

(2) 真空ビームダクト

粒子加速器とりわけ電子貯蔵加速器の真空ビームダクトは単に円型断面のパイプということではなく、冷却パイプ、ヒーター溝、ポンプ室などの機能を備えた複雑な断面形状となる。真空ビームダクトは基本的にはアルミニウムサッシの型押し法と同一の方法で作られ、超高真空特性を得るため図3で示した特殊押し法という工夫を行っている。イオンポンプのケース、ゲート弁のケースにも特殊押し材を適用している(図7)。

(3) ベローズ

機械的歪み、加熱脱ガス処理に伴う熱伸縮を吸収するためベローズを必要とし、ベローズはその用途によって

† コイルスプリング内蔵・アルミニウム外皮のメタルガスケット

図7 型押しによる偏向マグネット用真空ビームダクト (mm)。

1050, 3004, 5052, 6061 材を利用する。ベローズ部分は伸縮性と耐久性を持たせるため薄肉となる。一方端部は押し出によって作られた真空ビームダクトやフランジと溶接接合するために 2~4 mm の厚肉としている。ベローズ部の薄肉部と両端部の厚肉部は一体構造とし信頼性を高めている。

(4) イオンポンプ

電子貯蔵加速器ではビームを加速・貯蔵した状態で 10^{-7} Pa の超高真空が要求されるので、偏向電磁石の縦磁場を利用した組込型イオンポンプを主ポンプとする。アノードは 1050 磨材をプレスによってペニング放電セルに対応した穴をあけ 5 段の積層とする。カソードは Al-Ti-Zr 合金の $\phi 3$ の棒をアノードセルをくし刺しにする構成とした。固定枠は 1050 磨材とした。

(10~50) dm³/s (10~500 L/s) イオンポンプのアノードも組込型イオンポンプと同様とした。カソードはポンプのケースと同一とし特殊押しによる Al-Ti-Zr 材とした。押し出によって作られたイオンポンプケースにはヒーター溝が設けられ、その溝にはアルミニウムシースヒーターが埋め込まれて、保温材を用いず 423 K (150°C) のほぼ均一な加熱脱ガス処理が出来る。He リークテストのみでバージンのイオンポンプの初期排気により 86.4 ks 後 10^{-6} Pa 以下に達する。さらに 423 K と 86.4 ks の加熱脱ガス処理後 86.4 ks で 10^{-8} Pa オーダーの超高真空に達する。時間さえあれば全く加熱脱ガス処理を行わず 10^{-8} Pa オーダーの超高真空も得られる。

(5) ゲート弁

超大型粒子加速器の真空ビームダクトを真真空的に多区間に分離することは組立・維持・改善などの作業効率をよくするうえで重要である。電子貯蔵加速器のゲート弁にはアルミニウム合金という要求の外、ビームインピーダンス整合のため非円型開口部を持ち、かつゲート弁が開いた状態でビームに伴う壁電流を滑かに流す構造とするなどの厳しい要求がある。これらの要求を満たすため

図8 中間排気2重鏡面シールゲート弁。

全く新しい気密封止原理に従った中間排気付 2 重超鏡面シール方式を用いた (図 8)。ゲート弁の中間に遠隔操作可能な仕切板があり、この仕切板にはめくらの部分と非円型の開口部がある。ゲート弁のケースには 2 組の中空の 2 重ベローズがありこれらは遠隔操作で圧縮空気を用いて伸縮される。中空、2 重ベローズの仕切板に面した端部は薄いアルミニウム合金のダイアフラムとなっている。仕切板表面はダイヤモンド切削で超鏡面に仕上げ、イオンプレーティング法の CrN コーティング処理がなされている。ダイアフラム表面も準鏡面で、両者は圧縮空気圧で圧接され気密封止を可能にする。中間排気ポンプの排気速度が 20 dm³/s (20 L/s) のとき圧縮空気圧 0.5 MPa (5 kgf/cm²) で片側大気、もう一方の側を超高真空とすると全リーク量は 2.6×10^{-11} Pa・m³/s (2×10^{-10} Torr・L/s) 以下となっている。

(6) アルミニウム合金とセラミックまたはサファイアとの真空ろう付け

アルミナ磁器や単結晶のサファイア (いずれも Al₂O₃) の表面に MoMn メタライズ層を形成し、Ni めっきの後熱処理を行う。アルミニウム合金 3003 とメタライズされたアルミナ磁器を真空中で Al-Si-Mg ろう、例えば BA-4047 を用いて真空ろう付けを行う。真空ろう付け法により多様な真空端子、セラミックチェンバー、サファイア窓などを作ることが出来る。この方法でこれまでコパールとアルミナ磁器を用いた BNC シリーズ、N シリーズ、SMA⁽⁷⁾、SHV などの同軸端子、8ピン、22ピン、48ピン、14P-BNC などの多極端子などすべての真空端子をアルミニウム合金化することが出来た。

こうして作られたアルミニウム合金真空端子やサファイア窓は電子ビーム溶接によってフランジや真空ビームダクトへの良好な接合が出来る。さらにアルミナ磁器とアルミニウム合金の真空ろう付けによる気密封止は常温と 423 K (150°C) とのくり返し加熱に耐える。また小型のものならば常温から液体窒素へ落下投入のくり返しにも気密を保つ。これまでアルミナ磁器と金属をろう付けによって接合しようとする熱膨張係数が広い温度範囲

図9 治具によって熱膨張係数の差によるギャップをコントロールする 125 A 端子.

(1) A-3003, (2) アルミナ磁気, (3) A-3003, (4) カーボン治具.

にわたって両者がほぼ同一の値を持つことが要求されていた。その意味で従来はアルミナ磁器とコパールの組合せが採用されていた。一方、アルミニウム合金の熱膨張係数はセラミックやサファイアのそれと比較するとかなり大きく、これまでの常識ではろう付出来ない。この弱点を克服するために図9で示されるようにアルミニウム合金の外側に熱膨張を制限し、真空ろう付け接合面のすき間を許容値に保つ治具を設ける。すなわち昇温、降温の過程でアルミニウム合金に塑性変形が起こっているのである。

6. アルミニウム合金材料と溶接

超高真空機器は表面のガス放出を出来るだけ減らすことと、真空漏れの原因となる材料の欠陥や溶接欠陥を無くすることが最も重要である。このため図3で示した特殊押出し材ではアルミニウム合金の表面を薄く緻密な安定な酸化層を形成することによりガス放出を極少にすることで克服し、さらに特殊押出しの出来ない大口径管では内表面の水酸化変質層を $\text{Ar} + \text{O}_2$ 雰囲気中で切削することにより特殊押出し材とはほぼ同等の極めて少ないガス放出率を得ている。

イオンポンプの電極に用いる板材は表面を平滑にする意味で磨き板を利用し表面の水酸化変質層を化学処理で除いて用いているが未だ十分な値に達していない。超高真空機器に用いるアルミニウムとその合金は用途によって1000シリーズから7000シリーズまで使い分け、さらに調質も微妙な使い分けが必要である。

ステンレス鋼の溶接と比較してアルミニウム合金の溶接は難しい。それは、(1)約10倍以上の熱伝導度を持ち熱の分散が大きく熔融温度に達し難く、かつ広範囲に熱影響が現れる。(2)熔融潜熱が1.5倍大きく、低融点にも拘わらず大きいパワーが必要になる。(3)線膨張率が2倍以上大きく薄板と厚板の溶接では歪みが大きくなる。(4)熔融金属の表面張力が約1/2と小さいので、熔融プールが垂れ下がり易い。(5)表面に強固な酸化皮膜が存在し、熔融金属中に残って溶接欠陥になり易い。(6)化学的に活性で表面は酸化層が生成された熔融金属は水素を溶解吸収し、ブローホールとして残る場合があり、気密漏れや継手強度の低下となる。(7)熱処理合金あるいは加工硬化合金の場合、溶接の熱影響によって母

材の機械的性質を劣化させる。以上の諸問題を用途、形状、厚みなどを考慮してAC-TIG, DCSP-TIG, パルスDCSP-TIG, 電子ビームなどの溶接法を適用する。溶接法、熱影響の回避、溶接欠陥の回避については文献⁽⁸⁾を参照されたい。

7. 問題点と今後の研究課題

(1) 動的ガス放出率

ビームを加速しない状態でのトリスタン入射リング(直径約120 m, 入射エネルギー, 加速エネルギーがそれぞれ2.5 GeV, 6.5 GeV)の到達圧力は全く加熱脱ガス処理を行わず 10^{-8} Pa のオーダーに達している。そこで423 K, 86.4 ks の加熱脱ガス処理の後 10^{-8} Pa に達するのが設計値であったことから、現時点でも設計値をクリアしている。ところがビームを入射・加速するとそれに伴って大幅な圧力上昇が起こり、ビームを加速・貯蔵して 5×10^{-7} Pa 以下という設計値には達していない。図10にビームによる圧力上昇とビームを貯蔵している電流と時間の積についてのデータを示す。第1回目の運転を始めた11月18日には目標値よりも4桁程大きな圧力上昇となって現れ、運転を続けているうちに徐々に圧力上昇は減少し、現時点では目標値まで残り約1桁に達している。圧力上昇の減少は初めは約1/2乗の勾配であったが最近になって約1乗の急な勾配に変わっている。このようなビームによる圧力上昇の原因は電子ビームが偏向マグネットで曲げられる際に発生するシンクロトロン放射による光(可視光からX-線領域までの連続スペクトル)が真空ビームダクトの内面を照射し、量子効果で発生する光電子が強い縦磁場でほぼ元の発生部分に戻りアルミニウム合金表面を衝撃し表面及び表面近傍に吸蔵されているガス分子を叩き出すことによるものであると理解されている。ビームによるこのような圧力上昇は設計の

図10 ビームに伴う圧力上昇がビーム電流と運転時間の積によって減少する様子。

段階から予想されておりビームによる自己クリーニング効果を期待していた。ビームによる自己クリーニングでは長時間を要するので積極的に表面をクリーニングする方法としてアルゴンガスによる放電洗浄が検討され、小型の電子貯蔵加速器ではかなりの効果が認められるが、大型の電子貯蔵加速器ではあまり効果が無いとされている。それは小型の電子貯蔵加速器では発生する放射光のエネルギーが 0.1 keV 台であるのに対し(東大物性研の SOR-RING では 400 MeV で 0.13 keV) 中型の電子貯蔵加速器では発生する放射光のエネルギーが keV 台(高エネ研の PF-RING では 2.5 GeV で 2.8 keV)となり Ar ガスの放電によって表面を叩く荷電粒子のエネルギーが数 10~数 100 eV と小さく放射光で叩くエネルギーに達しないので効果が少ないと考えられている。加熱脱ガス処理では到達圧力は容易に 1~2 桁は改善されるにも拘わらずビームによる圧力上昇にはほとんど効果が認められない。これは加熱脱ガス処理ではクリーニングは単に表面に吸着しているガス分子のみで表面近傍に吸蔵されているガス分子はほとんど影響されないことを示している。以上のことを考慮すると現在建設中の電子・陽電子ビーム衝突リングではビームによる圧力上昇をビームによる自己クリーニングのみで設計値を達成しようとする大幅な時間延長を要し効果的でない判断される。それで次に述べる 3 つの方法⁽⁹⁾によりビームによる圧力上昇を抑えることを検討している。(1) 現在ビームによる圧力上昇のガスの成分は主に H_2 と CO でありアルミニウム合金の溶湯処理の段階に含まれているガス成分が大きく関与していると考えられ、アルミニウム合金のガスの定量分析法の確立とガス成分を大幅に減らす方法の確立を図る。(2) 特殊押し出し法で製造された真空ビームダクトの内表面近傍に吸蔵されているガス分子を除去するため 10~20 keV の電子ビームを照射し積極的にクリーニングする。(3) 真空ビームダクトはビームインピーダンスの整合を得るためマイクロ波の伝送路のように断面形状が一定の構造に設計されているので、 $f_0 \sim 2500$ MHz のマイクロ波電力を真空中に投入し、マイクロ波による放電で十分高い荷電粒子の表面の衝撃によって積極的にクリーニングする。(1)~(3)の方法はクリーニングの後、大気に曝すこととなるがガス分子の吸着は表面のみであり表面近傍のクリーニングされた部分はその状態を保持していると考えられる。(1)~(3)の試みを定量的に調べる方法として次の試験を行っている。電子貯蔵加速器の偏向電磁石部分の真空ビームダクトから分岐管で放射光を取り出し各種処理のアルミニウム合金サンプルに照射する。放射光のエネルギースペクトル、強度、照射時間を正確に調べておき、サンプルから放出されるガスの量、ガスの種類、その時間変化を記録する。データの例⁽¹⁰⁾を図 11 に示す。 η は放射光によってアルミニウム

図 11 η とフォトンのドーズの関係。文献(10)より転載。

合金表面で発生した光電子 1 個が再び表面を叩く時に発生するガス分子の数で

η =放出されたガス分子の数/表面を衝撃した電子の数で定義される。これまでの電子貯蔵加速器のビームによる圧力上昇の原因はアルミニウム表面の光電子による放出ガス分子と理解されていたが、トリスタンのような超大型の電子貯蔵リングでは放射光のエネルギーは数 100 keV にも及びアルミニウム合金の内部まで十分に進入出来(進入深さは 256 keV で 34 mm)アルミニウム合金内部で電子を励起させアルミニウム合金内部に残っている原子状または分子状の水素あるいは一酸化炭素にエネルギーを与え拡散によって表面に湧き出してくると筆者は推定している。

(2) 低電気抵抗による渦電流

真空ビームダクトを早いくり返しの磁場中に組込むとステンレス鋼に比較して約 15 倍導電率の低いアルミニウム及びその合金は渦電流効果が大きくなり問題となる。電子貯蔵加速器では幸い磁場の変化が緩やかであり問題とならないが、磁場の変化の早い陽子シンクロトロンあるいは電子シンクロトロンでは問題となる。また最近核融合分野で低放射化材料としてのアルミニウム合金が注目され具体的設計検討がなされているが、トカマク型の磁場では磁場の時間的な変化による渦電流が問題となっている。このように加速器や核融合装置でも従来のステンレス鋼の設計をアルミニウム合金の設計に単に置き換えるだけでは解決せず、工夫が必要となる。このような渦電流効果を低減するには材料の厚みを小さくすることが考えられるが強度などの点で新たな問題が生ずる。材料の厚みを約 1/10 にし強度も解決するには、(1)ペローズで薄肉化、(2)ハニカムで等価的に薄肉化する、(3)

ベローズとハニカムあるいはカーボン繊維などの複合材料で強化するなどが考えられ今後の研究の方向であろう。

8. ま と め

低放射化材料としてのアルミニウムとその合金の地位が確立された今日、加速器、核融合、原子力関連分野での新規計画ではすべてアルミニウム合金システムの適用が検討されるようになった。ステンレス鋼と比較して1~2桁低いガス放出率を達成すること、全く加熱脱ガス処理をしなくても 10^{-8} Pa オーダの超高真空が得られること、比較的低い温度で短時間の加熱脱ガス処理で極めて短時間に 10^{-8} Pa オーダの超高真空が得られることが大規模システムで実証された。加熱脱ガス処理のくり返しに耐えるメタルガasketを用いたアルミニウム合金の超高真空フランジ継手の実用になった。カソードを含めてすべてアルミニウム合金のイオンポンプで極めて短時間で加熱脱ガス処理なしに 10^{-7} Pa に到達するイオンポンプが実用になった。局所的な大きな熱負荷に耐えるアルミニウム合金システムを実証した。くり返し使用可能な超鏡平面による気密シール機構でゲート弁、アルミナ磁器やサファイアとアルミニウム合金との熱膨張係数の大きな差異にも拘らず真空ろう付けによる気密封止により多様な真空端子、窓、セラミック真空ビームダクトが実用になった。以上が高エネルギー物理学研究所の研究開発で明らかにされたことである。アルミニウム合金超高真空システムの特長を列举すると次の如くなる。

- 放射能被曝の低減
- 極めて低いガス放出率
- 良好な熱伝導、導電率…欠点ともなる
- 完全非磁性
- 極低温での熱変態がない
- 多様な合金素材、調質の選択可
- 多様な加工技術、表面処理技術の応用可
- 高エネルギー粒子の透過能が大きい

- 軽量で比強度が大きい
- 素材・加工を含めて総合的に低コスト

9. 今 後 の 展 開

トリスタンに続いて東北大学の次期加速器、理研、米国のスタンフォード線型加速器センターの線型衝突器(SLC)、フェルミ国立加速器研究所の超々大型衝突器(SSC)などは全アルミニウム合金で計画されている。核融合の分野では名大プラズマ研のR計画が全アルミニウム合金の設計としている。半導体製造装置のMBEシステムのアルミニウム合金化も既に始まっている。さらに高級分析機器、電子顕微鏡、原子・分子衝突実験装置などの汎用真空装置もアルミニウム合金化が始まっている。約20年前、鉄からステンレス鋼に転換され超高真空が身近になったように今後はアルミニウム合金に急速に転換されるであろう。動的ガス放出、溶接、表面処理、渦電流の問題などについては金属の専門家の協力を是非とも必要としている。また超高真空技術の応用によるアルミニウム中の水素ガスの定量分析とガスの除去について研究を進めており、これまでと異なった視野からの我々の研究が金属の分野へ寄与出来るかもしれない。

文 献

- (1) 西川哲治：応用物理，**4**(1977)，334.
- (2) 石丸 肇：科学朝日，**1**(1983)，75.
- (3) 石丸 肇：KEK-ASN-111, Jan., (1978).
- (4) H. Ishimaru：Journal of Vac. Sci. & Technol., A2, **4**(1984)，1170.
- (5) 成島勝也，石丸 肇：真空，**4**(1982)，172.
- (6) 石丸 肇，成島勝也，水野 元，渡部広美，久保富夫，山口博司，堀越源一：第4回加速器ストーレージングにおける超高真空研究会，高エネ研，KEK-82-3, (1982)，76.
- (7) H. Ishimaru：Vacuum，**32**[12](1982)，753.
- (8) 石丸 肇：核融合研究，**3**(1982)，293.
- (9) 百瀬 丘，成島勝也，水野 元，石丸 肇：第5回加速器ストーレージングにおける超高真空研究会，高エネ研，(1984・3月).
- (10) O. Gröbner, T. Momose, H. Mizuno, M. Kobayashi, K. Kanazawa, G. Horikoshi, K. Narushima and H. Ishimaru：KEK-83-18, (1983).