

安全を犠牲にしない クライオポンプの 水素排気速度最大化

ヘリックス・テクノロジー、Brian Thompson および Michael Eacobacci

イ

オン注入プロセスが行われる過酷な条件において、装置の稼働率、スループット、製品歩留りを最高水準にするには、安定した真空状態を作り出すことが必要です。真空環境におけるビームの相互作用

**イオン注入プロセスで使用される
クライオポンプの最適化に努めた結果、
厳しい安全規約に即しながら水素排気速度を
上げるという設計が生まれました。**

などの運転条件が最適に維持されたとき初めて、イオン注入装置は最高の生産性を達成します。スループットと品質を向上させるには、特に排気ガス負荷が高くなる高ビームパワープロセスで、イオン注入装置の高真空での排気速度を上げなければなりません。

水素はイオン注入プロセスでフォトレジストから解放される主要なガスであり、高い

アウトガス圧の要因になるため、装置メーカーは、絶えずそのシステムの水素排気速度を改善することに重点をおいています。

このような状況で、クライオポンプの設計は、水素および他のガス種に関わるすべ

ての安全ガイドラインに従いながら、最高の水素排気速度を実現するようなものでなければなりません。この論文は、ヘリックス・テクノロジー (Mansfield, MA) およびアトメル社 (San Jose, CA) の研究に基づくもので、水素排気速度の向上とイオン注入真空システム

の安全規約の強化という、場合によっては相反する要求について言及します。

イオン注入プロセスの条件

ガス組成

望ましい真空性能を達成する上で、イオン注入プロセスのガス組成を把握することは不可欠です。図1に示す測定結果は、

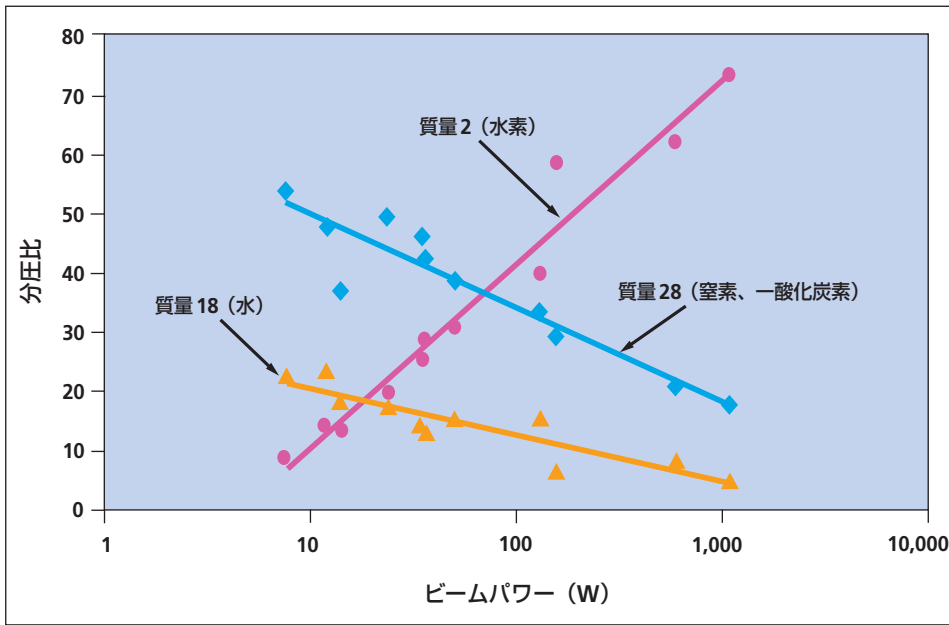


図1：各種イオン注入処理におけるフォトレジスト排気ガスの分圧比
水素ガスの割合がビームパワーに応じて増加しています。

中電流および高電流イオン注入装置のいくつかの残留ガス分析 (RGA) 結果が、以前の研究^{1, 2}に即していることを示しています。つまり、ガスの相対組成のグラフを見ると、ここでは水素ガスの割合がビームパワーと共に増加していることがわかります。この図は、注入プロセスで発生する主要な3つのガスの分圧比とビームパワーの関係を示しています。(同じデータをビームエネルギーまたはビーム電

低パワービームは均等に配分された混合ガスを生成する傾向にあります。しかしながら高エネルギーおよび高電流注入では、ビームパワーが高まるにつれ、水素分圧が急速に増加します。

流との単独関係でグラフに描くと、相関関係が弱くなります。) これらのデータから低パワービーム (中電流注入) は、どの単体ガス成分も 50% を超えない、比較的均整のとれたガス混合体を形成する傾向にあるのがわかります。ビームパワーが高くなると、例えば高エネルギーで高電流の注入では、排気ガスの中の水素分圧が急激に高くなります。

ガス圧のプロセスに与える影響

高エネルギー注入装置の真空に関わる第一の問題は、エネルギーコンタミネーションです。非常に高速なイオンが最終加速領域を通過する前にビームラインの中でガスと相互作用を行うと、ドーパントから電子をはじき出します。その結果このイオンは、当初想定したエネルギーより高い

エネルギーでウェハーに当たります。また、抑制できない圧力の変動があると、注入角が変わったり、均一性が低下したりすることがあります。

低エネルギーイオンビームは、正の空間電荷によりビームの幅が徐々に広がる、いわゆる「ブルーミング」という現象に苦しめられることがあります。このブルーミングに対処するため、イオン注入装置では、しばしばビーム空間に電子を制御しながら加えることがあります。多くの場合、イオン化しやすいガス (例えばキセノン) を真空空間に加えます。フラッドガンから放出される電子が、ビームの空間電荷を低くするのに役立ち、それによりビームがターゲットに届きやすくなります。

しかし、キセノン原子は大きな電荷交換断面を持つため、ビームイオンと直接、作用し合って、ドーパント原子を中性にします。フォトレジストにより生成される分子もこの種の相互作用を起こさせます。ドーパント原子は最終光学系に入る前に影響を受けるので、これらの原子は、不適切なエネルギーでウェハーに到達することもあれば、全く到達しないこともあります。また、ドーパント原子は最終光学系に入った後に中性化されることがあり、その場合、線量測定装置でカウントされません。いずれの場合も注入品質の低下につながります。圧力が所定の臨界基準値を超えると、注入制御装置の多くはプロセスを待機状態にし、ポンプが追従するのを待つため、装置のスループットを落とすことになります。

中電流イオン注入装置が持つこの問題は、高電流および高エネルギー注入装置についても同様の影響を及ぼします。さらに、スキャン型またはリボンビーム型中電流装置では、ウェハーへの平行ビーム入射を確実にするために、より複雑なビーム用光学系が使用されています。したがって、ビームイオンが静電あるいは電磁コリメーティング構造中の残留ガスにより中性化されると、注入角が正しくなくなることがあります。

イオン注入プロセスでのクライオポンプの役割

クライオポンプの作動原理

極低温 (クライオジェニック) 高真空ポンプ、すなわちクライオポンプは、極低温にまで冷却したポンプ内表面上に空気分子を凍結させることにより高真空を作り出します。このポンプの代表的な真空度の範囲は、 $10^{-2} \sim 10^{-7}$ パスカルです。クライオポンプには、真空に晒される可動部品がありません。そのため、オイルを必要とせず、本質的に清浄な真空を作ります。このポンプにより作られた真空では、製品が汚染されません。プロセスチャンバーに晒されるのは極低温に冷却された表面だけです。

通常クライオポンプの内部には、特定のガス種を凍結ないし捕捉するために異なる極低温に設定した2つのステージ、つまりポンプ領域があります。これらのステージは、外部コンプレッサーにより作動するシールされた極低温冷凍機に接続されます。この冷凍機により前述のステージが冷却されます。一部のポンプでは、ステージの温度調節ができるため、特定のガス種をプロセスチャンバーから排気するためにポンプを調整することができます。

ポンプの第1ステージでは、その主要ポンプ表面が入口配列（アレイ）を形成し、通常 65 ~ 100 K の温度で運転が行われます。その主要な機能は水蒸気を排気し、捕捉することです。第二ステージは金属のポンプ表面により構成され、そのポンプ表面はアプリケーションごとに異なる設計パターンで配置されます。通常 10 ~ 20 K の温度で運転するこのステージでは、窒素やアルゴンといったガスを排気することができます。金属のポンプ表面は、一部が活性炭の粒子で覆われています。第二ステージの通常温度では凍結しない水素やヘリウムといったガスは、この活性炭の粒子に吸着され、結果的に真空チャンバーから除去されます。図2にクライオポンプの構造図を示します。

クライオポンプの水素容量増大に伴う安全性への影響

まず、プロセス制御の向上に必要な水素排気速度と、長い再生インターバルを可能にするクライオポンプの水素容量とを分けて考えることが重要です。クライオポンプの水素排気速度は、工業規格の ISO 1608-1:1993 (E) の仕様に従っ

高い排気速度を達成するため、 水素容量を増やさずに、 水素のクライオ吸着剤までの コンダクタンスおよびクライオ 吸着剤の水素捕捉確率を高める 必要があります。

て製作された速度ドームにより測定します。水素容量は、ポンプがその有効排気速度がその最大値の 50 % に落ちるまでに、いわゆる「クライオ吸着」できる水素の量に関係します³。この容量はポンプ内の全クライオ吸着剤の量により決まります。

水素排気速度と水素容量は独立した機能ですが、お互いに関連するように受け取られていることには、実際上の理由があります。多くのアプリケーションの真空プロセスでは、生産を開始する前にあるベース圧力に到達していなければなりません。クライオ吸着剤への吸着量が増すと排気速度が低下するため、クライオポンプに存在するクライオ吸着剤の量によって決まる絶対容量に到達するまで使用されることはありません。

図3に示す定流量水素容量曲線は、ISO 1608-1:1993 (E) で規定される標準速度試験で得られたものです。この図はヘリックス・テクノロジーの On-Board IS 320FE クライオポンプでのデータで、排気速度と排気された全水素量との関

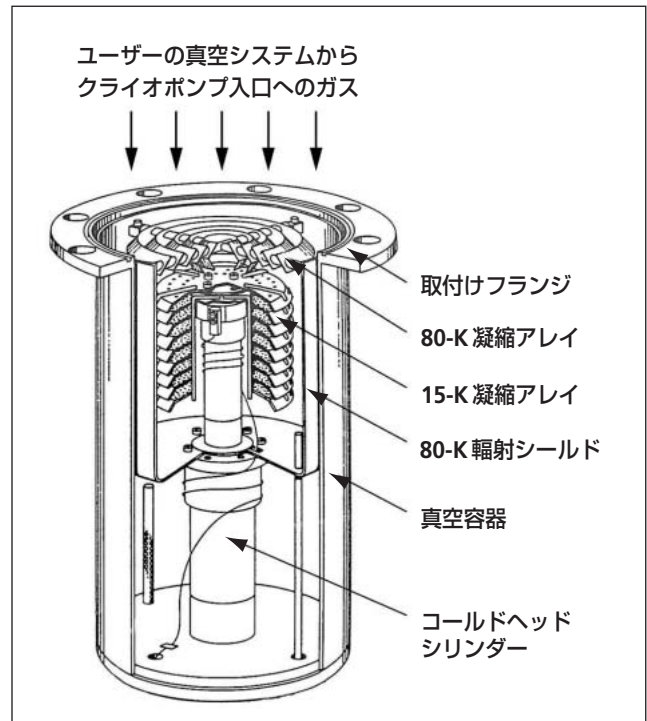


図2：クライオポンプ内部アレイの構造図

係を示しており、クライオ吸着剤の捕捉領域の飽和について説明したものです。ガスが蓄積し、ポンプアレイのクライオ吸着容量が飽和してくると、圧力が高くなり、実効排気速度が低下します。

クライオポンプの設計にあたって重要な目標の一つは、高い水素の排気速度を得ることです。水素容量を増やさずにこの目標を達成するには、水素のクライオ吸着剤までの全経路でのコンダクタンスを改善し、クライオ吸着剤の水素捕捉確率を高める必要があります。別の手段として、真空空間に単にクライオ吸着剤を増やすことにより水素排気速度を高めることができますが、それにより絶対的な水素容量も増え、そのため内部に蓄えられる危険化学物質の潜在的エネルギーが高くなります。ですから、IS 320FE ポンプの設計の際、エンジニアはクライオ吸着剤へのコンダクタンスの最大化、クライオ吸着剤の捕捉確率の最大化、クライオ吸着剤での水素捕捉温度の最適化に焦点を当てました。

クライオポンプの最適化

コンダクタンスの最大化

水素の第二ステージアレイおよびそこにあるクライオ吸着剤へのコンダクタンスの最大化は、平行して研究されました。様々な真空空間の設計をモンテカルロ法を使用して入念に分析したことにより、研究者たちは特殊サイズの輻射シールドに適合する最適な第二ステージのアレイサイズを発見しました。水素がクライオポンプに最適な形態で導かれるように、また水素分子が一旦輻射シールドの内部に到達した後、クライオポンプから反射して元に戻る確率が最小になるような設計の開発を行いました。

図4に、標準水素捕捉確率 40 % の従来型アレイを最適化した結果を示します。この分析では、第二ステージアレ

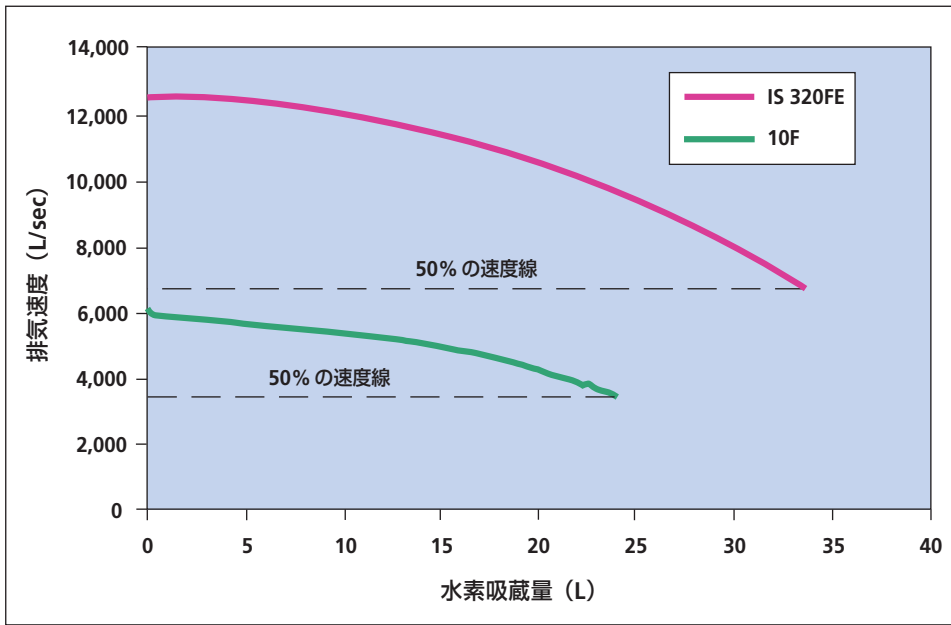


図3：IS 320FE および 10F クライオポンプの水素容量
 クライオアレイにガスが蓄積するにしたがい圧力が上がり、有効排気速度が低下します。

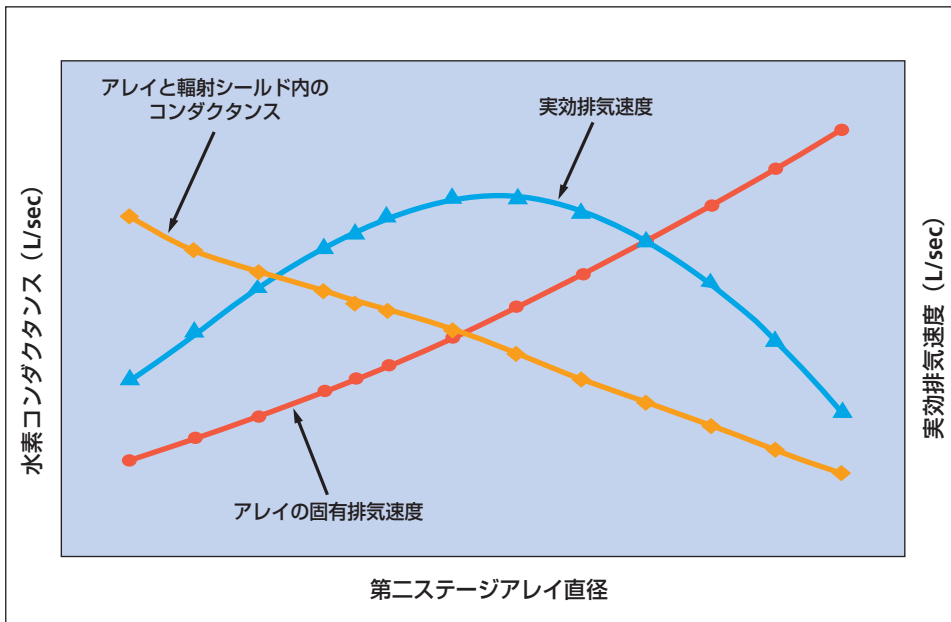


図4：標準捕捉確率のための第二ステージアレイの最適化
 第二ステージアレイの直径とアレイの側面および背部への水素コンダクタンスとのバランスを最適化することにより、ベストなシステム性能を達成することができました。

アの直径を変化させました。アレイの直径が増すにつれ、その捕捉面積および速度が増加しました。しかし同時に、大きなアレイは有効スペースの大部分を占めるため、アレイの側面および背面への水素コンダクタンスは減少しました。これらのバランスを取ることで最適値が得られましたが、全体の水素排気速度の目標増加幅は得られませんでした。それでも部分的には、アレイの水素捕捉クライオ吸着剤への水素コンダクタンスが増加したことにより、

第二ステージの捕捉確率の著しい増加が達成できました。

図5では、水素捕捉確率が80%以上のアレイに対して、熱の問題をモンテカルロ計算で検討しました。アレイのサイズが大きくなるに従い、排気速度が増加しました。しかし、大きなアレイほど熱負荷は大きくなりました。この設計では、第二ステージアレイにより吸収される熱負荷が、最適な設計値が得られた領域で急激に増加しました。しかし、この熱負荷に対処するため冷凍能力を倍にすることは極端に費用がかかります。そこでシステムを最適化するには、水素分子の捕捉確率の増加と要求される冷凍能力の増加のバランスが必要となります。

したがって、最適な設計は、図4のピークと冷凍機のコストによって決まる現実的な限界とのバランスを意味することになります。適正なバランスは、図4で示されるよりも高い第1衝突捕捉確率で、ピーク排気速度を直径が大きくなる方にずらして計算しました。

水素捕捉確率の最大化と温度の最適化

クライオ吸着剤の全体的な捕捉確率改善に寄与したいいくつかの要因：

- 極低温冷凍機の第二ステージヒートステーションとクライオ吸着剤表面の間の温度勾配を最小にしました。この温度勾配を最小にするため、クライオ吸着剤から第二ステージヒートステーションへ伝達される熱に対して熱伝導経路を十分なものとしました。さらに、クライオ吸着剤をアレイに

接着するのに高品質で耐久性のある接着力を持ちながら、温度勾配を最小にするような材料と方法を選定しました。

- クライオ吸着剤の表面は顕微鏡で観察すると粗いものです。クライオ吸着剤の表面が粗いということは固有捕捉確率が最大になるということなので、水素排気速度に有利に働きます。また、このことは最初の衝突で吸着しなかった水素分子を、次の衝突で吸着することを促進する

ことになります。さらに、表面の粗いクライオ吸着剤は吸着のための表面積を大幅に増やすので、飽和限界を高めることになります。

- クライオ吸着剤の温度は、表面での捕捉確率とクライオ吸着剤ベッド間の水素拡散とのバランスが取れるように維持しました。制限付きテスト⁴によって示されるように、第二ステージ温度は従来型のクライオ吸着剤での水素捕捉確率への影響がほとんどないのに、捕捉場所から離れる水素拡散には大きな影響を与えています。そこで、最適なクライオポンプシステムは、ポンプに水素が飽和するまで初期の排気速度を維持するよう、第二ステージの冷凍機温度を 13.5 K ± 0.5 K に制御します。

クライオポンプの設計比較

前述の分析プロセスおよび設計法により、クライオポンプの水素排気速度に著しい改善が見られました。例えば、図6は圧力に対する水素排気速度の関係を示しますが、IS 250FE クライオポンプの排気速度は、IS 250F より 55% アップの 7000 L/sec が得られることが分かります。この増加速度は正確な分子フロー条件で達成されたもので、 10^4 Torr 以下の数乗 Torr 範囲にわたって安定しています。この強化型ポンプは標準モデルと同じ水素容量を持っていて、クライオ吸着剤を増やすことなく、水素排気速度を顕著に向上させることができることを示しています。この特徴により、ポンプは確実に安全設計要綱に従っていることになります。また、図6のように、IS 320FE (320 mm) クライオポンプは 12,000 L/sec を超える水素排気速度を達成しています。図3に示すように、このポンプは 32 標準リットルの水素を貯蔵するのに十分なクライオ吸着剤を保有しています。

停電についての考察

短時間停電の際には、安全の見地から、クライオ吸着され、凝縮された水素ガスを適切に処理することが重要になります。一方、長期停電の際には、クライオポンプに捕捉

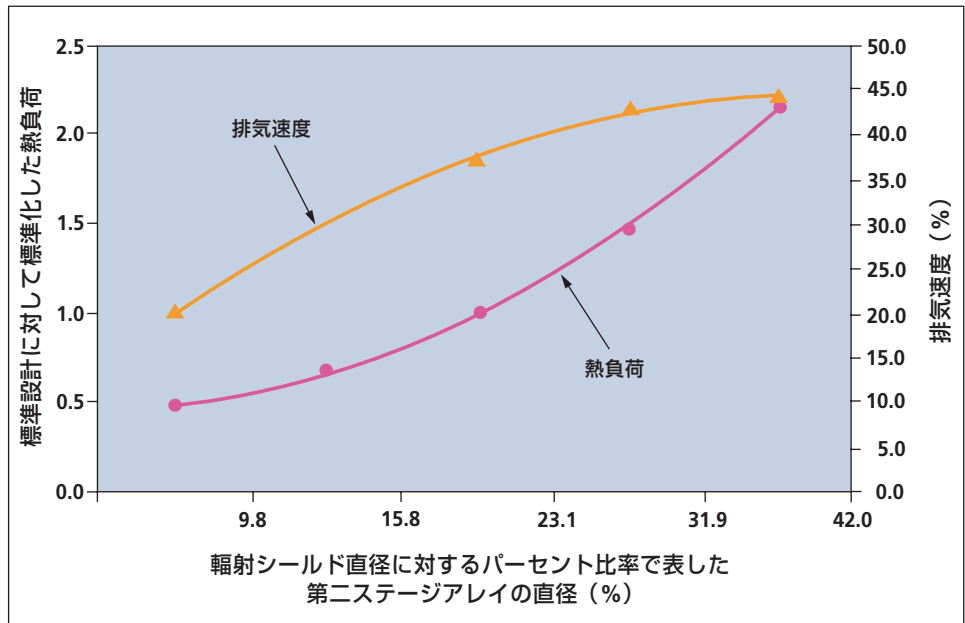


図5：高捕捉確率のための第二ステージアレイの最適化

ポンプ全体の設計の最適化には、増加する水素分子の捕捉確率と増大する熱負荷、すなわち必要な冷凍能力との間のバランスが必要です。

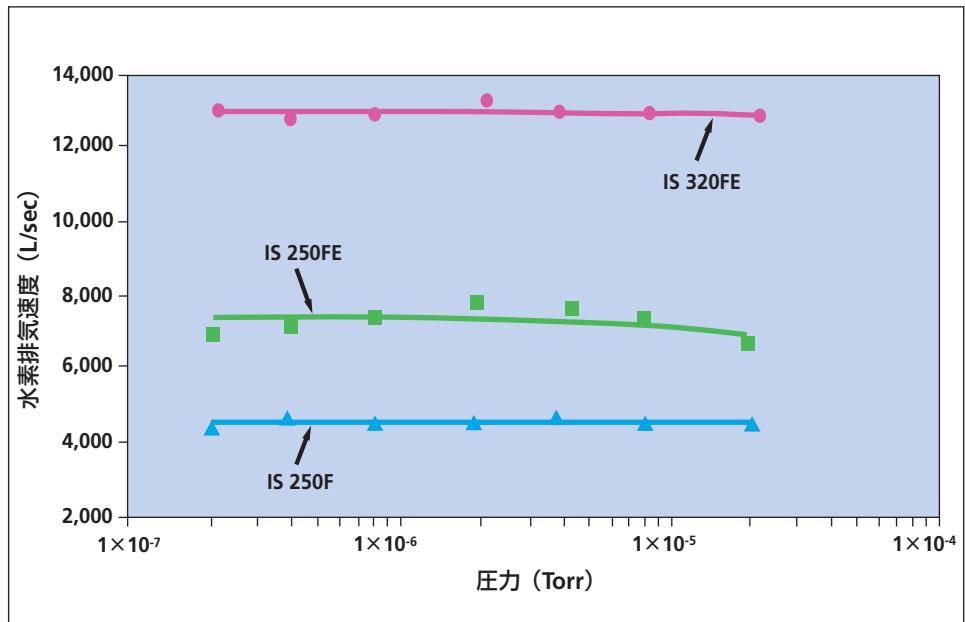


図6：クライオポンプ3基の水素排気速度と圧力の関係の比較

された潜在的に反応性を持つガスを安全な方法で放出する必要があります。そのためクライオポンプは、非通電時に開になるパージならびに排気弁を備えていなければなりません。

エンドユーザーは、30秒足らずの短時間停電のために2~3時間の長い再生サイクルの実行を強いられたくはありません。エンドユーザーが非常に短い停電による弊害から解放されると、装置の稼働率を大幅に上げることができます。そのような機構がなければ、30秒の停電が1週間に2~3回あると、不測の装置休止時間は10時間にもなり、

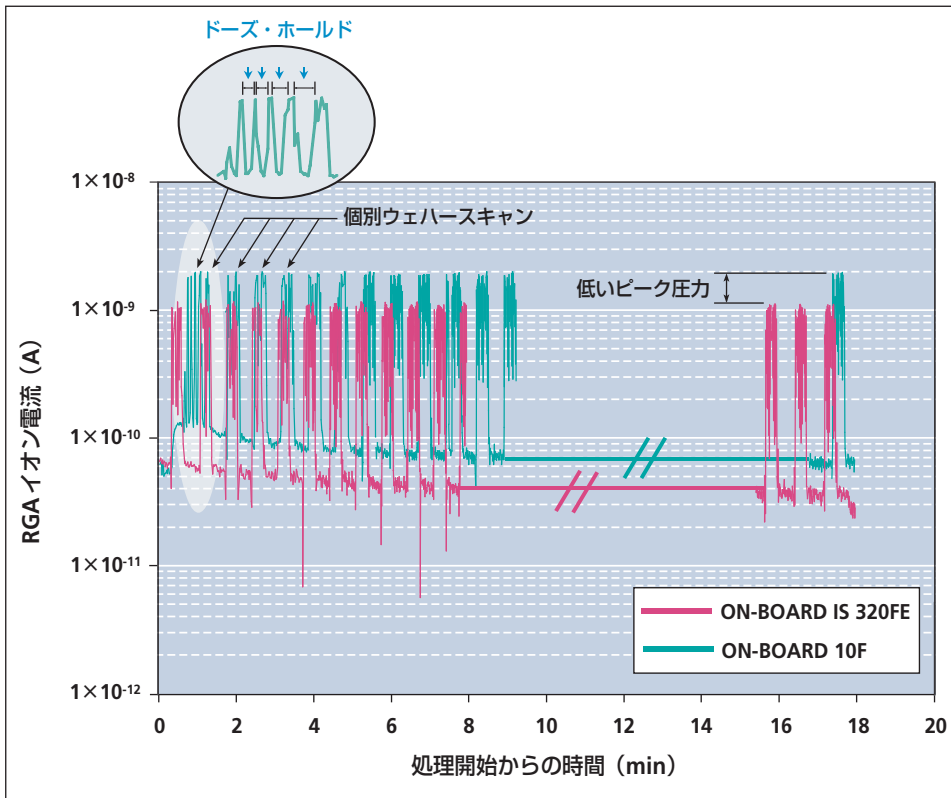


図7：クライオポンプ2基の水素排気ガス比較
新しいポンプは水素分圧を43%減らしました。拡大図に示す複数回のドーズ・ホールドは、ウェハー処理時間を増やし、装置のスループットを下げます。(データはアトメル社提供)

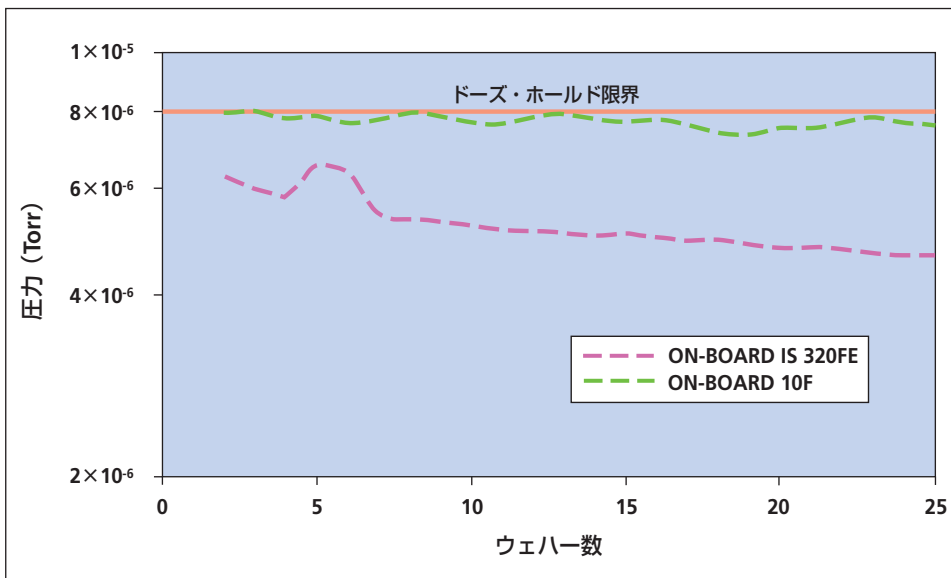


図8：クライオポンプ2基のエンドステーションピーク圧力の比較
新しいポンプは、ピーク圧力を33%減らし、複数回のドーズ・ホールドを不要にしました。(データはアトメル社提供)

生産性の二次的損失となることがあります。
ここで説明するクライオポンプは、内蔵バックアップ電源（無停電電源装置）を備えており、これは、慎重に選択された安全時間である2分間、真空空間のパージ弁を閉

状態に保持します。結果として、短時間の停電が頻発する場所でも装置の高い稼働率が確保されます。真空空間のパージ弁が閉になっているこの時間は、一般的な短時間停電よりもはるかに長いものです。ただし、この時間は、停電が長期化したときに起こるような、凝縮された水素ガスが第二ステージ表面から大量に放出される事態までには至らない時間です。

イオン注入装置の性能の実証

IS 320FE クライオポンプの水素排気速度をテストするため、そのユニットをパリアンセミコンダクティブイクイップメント社 (Gloucester, MA) のイオン注入装置 EHPi-500 に取り付け、アトメル社の半導体製造環境において実際の条件下でテストを実施しました。図7のRGAイオン電流データは、10FモデルをIS 320FEポンプに置き換えたところ、ベークしていないフォトレジスト付きウェハーで著しい注入装置性能の向上が得られたことを示しています。新技術によるポンプは水素分圧を43%減らし、これは注入の均一性のみならず全体的な装置のスループットを高めるとい改良となりました。

水素分圧の減少に加え、このポンプは図8に示すように、ベークしていないフォトレジスト付きウェハーの処理に際して注入装置のエンドステーションでの全圧力ピークを33%も下げました。この減少により、複数回のドーズ・ホールドを行わなくてもよい場合があり、厄介な停止、起動を行うことなく、ウェハーを処理し続けることが可能です。図に示すように、10FポンプはIS 320FEよりも

かなり注入装置のドーズ・ホールド限界近くで運転しています。

図9では、ポンプ10FとIS 320FEのエンドステーションでの最大圧力の平均に与える影響を比較しています。こ

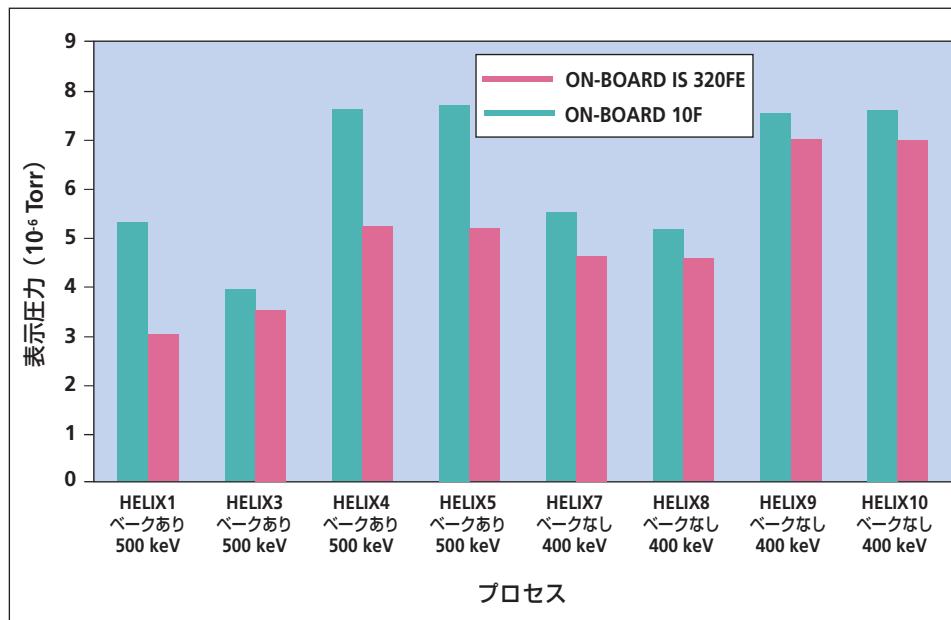


図9：多くのウェハーテストおよびプロセスにわたる最大エンドステーション圧力
平均エンドステーション圧力は20%減少しました。(データはアトメル社提供)

これらのデータは、ベークおよびベークなし両方のフォトレジストウェハーを使って、400～500 KeVの注入エネルギーで様々な処理条件の下に実施した多くのイオン注入試験ロットに基づいています。すべてのケースで、エンドステーション圧力は改善しました。

結論

クライオポンプシステムが、予見できる将来にわたりイオン注入装置の高真空排気の最良の手段であることに変わりはありません。多くの会社が生産性をあげる努力をし続ける中で、新しい真空システムは、プロセスやガス種の副産物が増大し変化するにせよ、ウェハー処理中に生成されるガスをすべて考慮して設計されなければなりません。

クライオポンプに取付けられるゲートバルブやフランジ・アダプターを通過する水素のコンダクタンスは非常に高いもので、これにより水素排気速度を最適化する処理が簡単になりました。これにしたがい、水素の捕捉確率は30%を超える増加を果しました。13 Kでは非常に低い蒸気圧となる大気中存在するガスの捕捉確率はおよそ35%で、水についてはもう100%に近い値です。言い換えれば、水蒸気や窒素の排気速度をこれ以上向上させることは、ゲートバルブやフランジ・アダプターによるコンダクタンスの限界のため、非常に難しくなります。

排気速度を大幅に上げるには、ガスの発生源にポンプアレイを正しく配置するなどして、新しい構造とすることが必要です。ポンプは大きくするか、ビームがウェハーに当たる箇所の近くに置く必要があります⁵。

真空系全体に配分されたインテリジェンスの進展を継続させることは、現在行われている安全性の強化とCOOの改善の両方を促進すると予想されます。

この傾向は、装置メーカーと真空ポンプサブシステム的设计者との緊密な共同作業を必要とし、その結果、プロセス制御とシステム動作可能時間および生産性の両方がさら

に洗練され、改良されていくこととなります。

参考文献

1. TN Horsky, 『高エネルギーおよび高電流イオン注入におけるフォトレジスト排気ガス』、イオン注入技術国際会議議事録 1998, vol. 1 (Piscataway, NJ: IEEE, 1999)、654–657
2. N Tokoro 他, 『MeV イオン注入のフォトレジスト排気ガスとクライオポンプ選定の考察』、イオン注入技術国際会議議事録 1998, vol. 1 (Piscataway, NJ: IEEE, 1999)、614–617
3. M Kimo 他, 『ガス状ヘリウムクライオポンプの性能および特性測定の推奨方法』、Vacuum Science and Technology 誌 17, no. 5 (1999): 3081–3095
4. PA Lessard, 『高真空領域における非凝縮物質の極低温吸着』、Vacuum and Science and Technology 誌 7, no. 3 (1989): 2373–2376
5. S Furuya 他, 『イオン注入装置用クライオポンプの開発』、イオン注入技術国際会議議事録 1998, vol. 1 (Piscataway, NJ: IEEE, 1999)、396–399



Brian Thompson 氏は、ヘリックス・テクノロジー (Mansfield, MA)、CTI 事業グループの技術製品マネージャーです。同氏はイオン注入プロセスに使用される On-Board IS 極低温真空システムの責任者です。同氏は Troy, NY の Rensselaer Polytechnic Institute で機械工学の学士とコンピュータ技術の修士を取得しています。

(Thompson 氏の連絡先: Tel. 508-337-5634 または bthompson@helixtechnology.com.)



Michael Eacobacci 氏は、ヘリックス・テクノロジーの上級科学技術者です。真空業界で28年の経験を持ち、極低温真空ポンプの分野で数多くの特許を所持しています。同氏は Boston の Northeastern 大学の機械工学学士および材料科学の修士学位を持ち、Babson Park, MA の Babson College において技術

管理の訓練を受けました。

(Eacobacci 氏の連絡先: 508-337-5221 または meacobacci@helixtechnology.com.)

HELIX

ヘリックス・テクノロジー株式会社

東京都大田区平和島 6-1-1
東京流通センターA棟2階

Tel : 03-5767-3411 (代表)
<http://www.helixtechnology.co.jp>

お問い合わせ先

本社／真空機器部

Tel : 03-5767-3413
Fax: 03-5767-3434

大阪営業所

Tel : 06-6364-5117
Fax: 06-6364-5175