

22型クライオポンプの省エネ化

村山吉信^{*1}・鹿野寛貴^{*1}・遠藤裕丈^{*1}・原山俊夫^{*1}・高橋康司^{*1}

22-inch Cryopump that Achieves Both Cost Reduction and Energy Saving

Yoshinobu MURAYAMA^{*1}, Hiroki SHIKANO^{*1}, Hirotake ENDO^{*1},
Toshio HARAYAMA^{*1}, Kouji TAKAHASHI^{*1}

^{*1}Engineering Department, ULVAC CRYOGENICS Inc, 1222-1 Yabata, Chigasaki, Kanagawa, 253-0085, Japan

The size of the glass substrate of organic light emitting diode (OLED) vapor deposition equipment has increased, the mainstream has changed from the conventional G6H to G8H, and the vapor deposition equipment has also become larger. Therefore, the cryopump used as a high vacuum pump will also be increased in size from 20 inches to 22 inches, and the pumping speed will increase. Introducing the history of the development of the 22-inch cryopump and the technology that realizes both cost reduction and energy saving of the cryopump system that will be adopted in the G8H in the future.

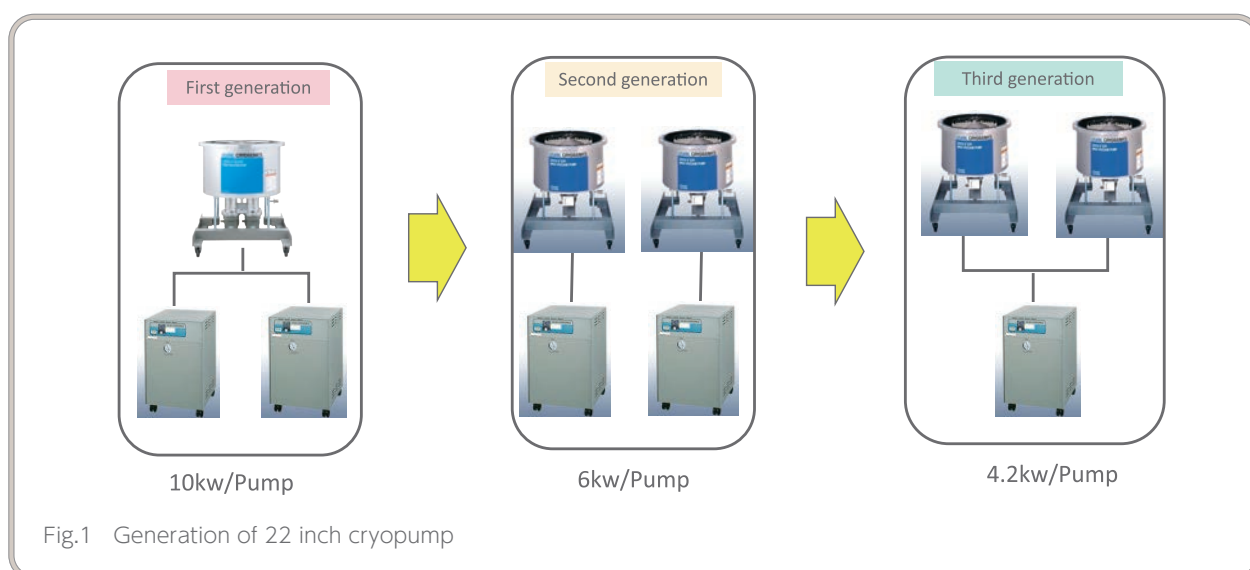
1. はじめに

有機EL (OLED) 用蒸着装置はガラス基板サイズが大型化しており、従来のG6H (1500×900 mm) からG8H (2250×2500 mm) へ主流が変わり、蒸着装置も容積比で2倍になると云われている。そのため、高真空排気用ポンプとして使用されるクライオポンプも20型からさらに排気速度の大きい22型へと大型化する。G6Hの装置では20型クライオポンプを1装置当たり約140台使用したので、G8Hの装置では約200台のクライオポンプを使用することが予想される。クライオポン

プメーカーへの要求項目としては、性能、品質、コスト、省エネルギー、調達のしやすさである。排気性能は当然のことながら、コストと省エネルギーについては使用する台数を考慮すると強く要求されることが想定される。ここではクライオポンプの排気性能を維持しつつ、コスト削減と省エネルギー化を両立した技術について紹介する。

2. 22型クライオポンプの世代移行の推移

22型クライオポンプの世代移行の推移をFig.1, 製品仕様をTabel 1, 外形図をFig.2, 3, 4に示す。



^{*1} アルバック・クライオ(株)
(〒253-0085 神奈川県茅ヶ崎市矢畑1222-1)

Table 1 Specification of 22 inch Cryopump series

		First generation	Second generation		Third generation
Cryopump	Model	U22H	U22B	U22BL	U22BL
	Quantity	1	1	1	2
Refrigerator	Model	RM50T	RM120ET	RM120ET	RM150ET
	Quantity	2	1	1	2
Compressor	Model	C30VRT	C30PVRT	C30PVRT	C100L
	Quantity	2	1	1	1
Pumping speed	N ₂	17000L/s	13000L/s	13000L/s	13000L/s
	Ar	14000L/s	10000L/s	10000L/s	10000L/s
	H ₂	25000L/s	15000L/s	16000L/s	16000L/s
	H ₂ O	39000L/s	39000L/s	39000L/s	39000L/s
Maximum throughput(50Hz)	Ar	4.1Pa · m ³ /s	3.0Pa · m ³ /s	3.0Pa · m ³ /s	Unmeasured
Pumping capacity	Ar	8.1E+5 Pa · m ³	5.8E+5 Pa · m ³	5.8E+5 Pa · m ³	5.8E+5 Pa · m ³
Cool down time(50Hz)		150min	170min	230min	Unmeasured
Power consumption(50Hz)/pump		10.0kW	6.0kW	6.0kW	4.2kW

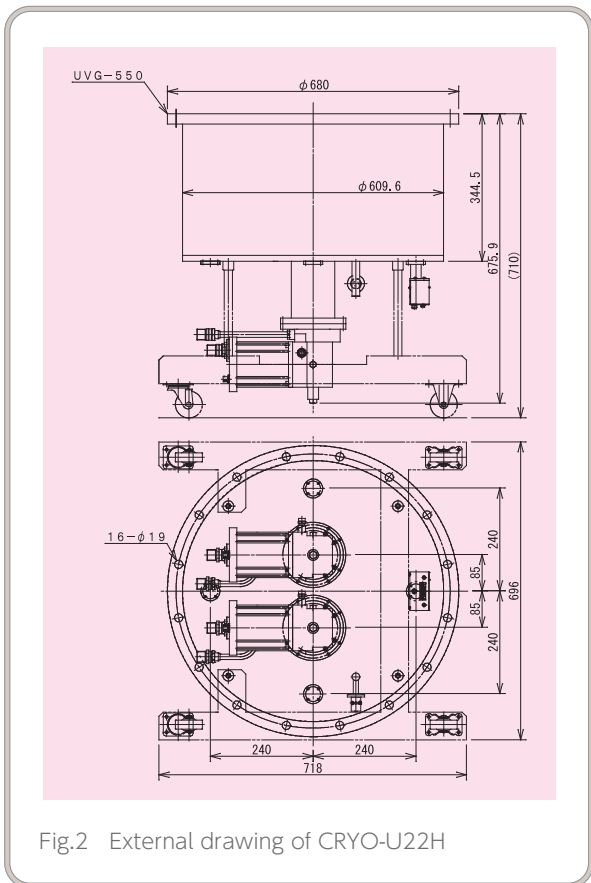


Fig.2 External drawing of CRYO-U22H

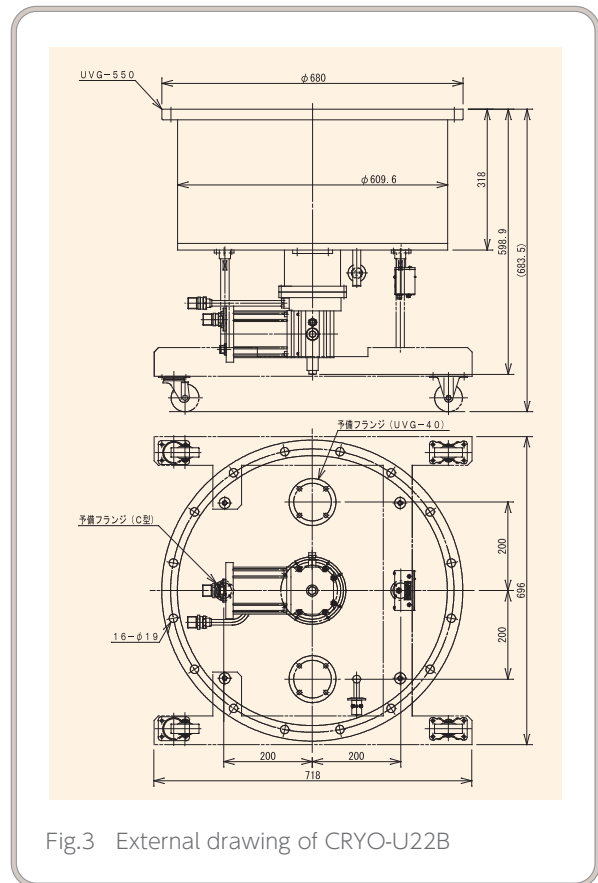


Fig.3 External drawing of CRYO-U22B

第一世代

光学用途や電子部品の蒸着装置に使用される「CRYO-U22H」が1988年にアイシン製のスターリング冷凍機の代わりにGM（ギフォード・マクマホン）冷凍機

を使用して開発された。現在もポンプの排気性能としては22型のシリーズでは最も大きな性能を有していることもあり、エンドユーザー、セットメーカーからの要求に応えるため、日本国内で生産され、使用されてい

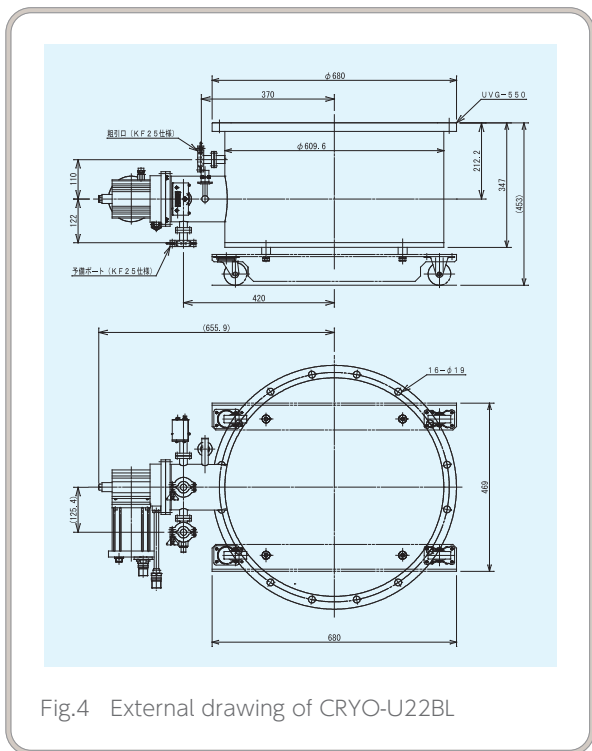


Fig.4 External drawing of CRYO-U22BL

る。

当時としては、2段式冷凍機で最大性能を有する「R50冷凍機」をポンプ1台に対して2台搭載し、冷凍機1台に対して「C30コンプレッサ」1台使用する構成としていた。つまり、ポンプ1台に2台の冷凍機、2台のコンプレッサを使用している。

第二世代

光学用途の蒸着装置の市場全体が海外シフトしていく中、海外との貿易に関して、安全保障上の制限が課せられる。

N_2 に対する排気速度15000 L/s以上を有する「CRYO-U22H」は安全保障上で該当品の位置付けとなり、海外への輸出は経済産業省の許可が必要で、審査に要する時間と短納期で依頼がくる顧客納期を勘案すると、出荷することは事実上困難な製品となった。海外の顧客要求に応えるため、非該当品で高性能、且つ保守費用が抑えられた22型クライオポンプを開発する必要性が生じた。

性能は N_2 に対する排気速度が15000L/sを下回り、 H_2O に対する排気速度は「CRYO-U22H」と同じ性能を有する。保守費用を抑えるために、これまでの「R50冷凍機」の2倍の性能を有する「RM120ET」冷凍機を開発し、ポンプ1台に冷凍機1台、コンプレッサ1台のシステムを実現した。2015年に縦型として「CRYO-

U22B」, L型（横型）として「CRYO-U22BL」を開発した。

2機種とも海外子会社で生産可能で、「CRYO-U22B」はARコーティング用の蒸着装置等に使用されている。

「CRYO-U22BL」は、業界では初めて22型クライオポンプで横型クライオポンプとなる。省スペースにクライオポンプを搭載することが可能となり、OLED装置に採用され始めている。冷凍機とコンプレッサが各1台のため、「CRYO-U22H」と比較すると、消費電力が40%削減されている。

第三世代

2016年にG6HのOLED装置用として20型クライオポンプ「CRYO-U20BL」を開発し、コンプレッサの半減を実現した。これにより販売コストを抑えつつ、装置使用中のエネルギーを削減することに貢献した。

コンプレッサ1台でクライオポンプ2台を運転するシステムで、前述した「RM120ET」冷凍機を使用し、コンプレッサから供給されるヘリウム流量が半減しても使用上で耐えうる性能を有していることを顧客評価で確認した。

G8HのOLED装置でも同じ論法でコンプレッサを半減する方向で対応が迫られることは必至であり、先んじて開発を着手している。コンプレッサを半減するには、冷凍機の効率を向上させ、性能を向上させる必要がある。単純に冷凍機の膨張室の容積を大きくすれば比例して冷凍能力は大きくなるが、冷凍機で使用するヘリウム流量が増加するので、既存のコンプレッサでは賄えなくなることが想定される。そのため冷凍機の開発と並行してコンプレッサも新規開発の必要がある。

第3世代として、22型クライオポンプの2台マルチシステム（冷凍機とコンプレッサ）を開発することになった。

3. クライオポンプに使用する冷凍機

クライオポンプは冷凍機の1段ステージと熱的に繋がっている80 Kシールド・80 Kバッフルが130 K以下、2段ステージと熱的に繋がっている15 Kクライオパネルは20 K以下に維持し、真空槽内から入射してくる分子をクライオポンプ内部のそれぞれの場所でガスを選択的に排気する。

80 Kシールドと80 Kバッフルでは主に H_2O 、15 Kクライオパネルでは N_2 、 O_2 、 Ar 、 H_2 を排気する。

クライオポンプ内部の各部品を所定温度以下に維持するためには十分な冷凍能力が必要となる。クライオ

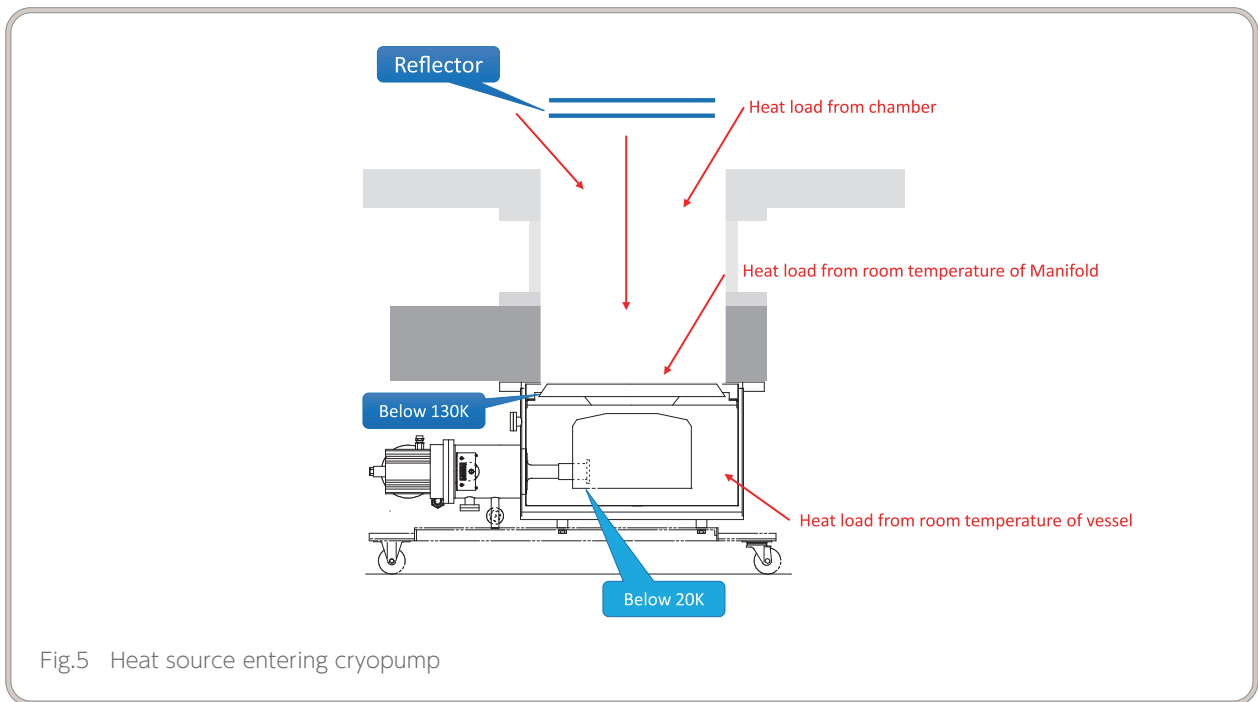


Fig.5 Heat source entering cryopump

ポンプへの入熱は、分類すると放射熱とガスによる熱伝導による入熱があり、蒸着装置での主な入熱は放射熱である。放射熱は放射率、表面積、温度の4乗に比例する。放射率は表面状態に依存し、装置の表面仕上げが良い状態においても、大きな空間はクライオポンプの吸気口から光学的に見た場合に放射率が大きくなる。また、温度に関しては室温面（300 K）と極低温面（20 K）の温度差は280 Kと大きい。対向する面が室温面でも大きな熱負荷となる。さらにプロセス上で基板を加熱した時の放射熱が加わると、冷凍機が処理しうる入熱を超える可能性があるため、通常は熱反射板をクライオポンプの前面に複数枚置いて熱対策を行っている。クライオポンプへ入る熱源をFig.5に示す。

一方、排気口の開口面積に対して熱反射板の面積、排気口から熱反射板の距離によっては、コンダクタンスが小さくなり、排気速度を低下させる原因になる。そのため熱対策と排気速度はトレードオフの関係にある。クライオポンプの性能を最大限に引き出すためには大きな性能を有する冷凍機を使用して熱反射板と排気口の間のコンダクタンスを大きくする必要がある。

22型クライオポンプは、80 Kバッフル、80 Kシールドが20型よりさらに大きな面積を有するため入熱も大きい。すなわち冷凍機の1段ステージの性能が重要視される。1段ステージへ大きな熱が入っても2段ステージが温度上昇しない冷凍機が望まれる。実際、クライオポンプに入る熱を冷凍能力の大きい1段で95%以上の熱を吸熱し、1段に対して相対的に冷凍能力の小さい15 Kクライオパネル（2段）への入熱を低減し、

残りの5%の熱を吸熱している。

但し、昨今の顧客はクライオポンプを再生する閾値として2段温度を20 Kとせず、17 K、15 Kといった低温に設定するケースが多い。装置運用上で、より早めに再生する傾向があり、再生周期を維持するには冷凍機の2段性能も大きくする必要がある。

4. 冷凍機システムの性能向上の目標

第二世代で使用した「RM120ET」冷凍機と「C30 PVRT」コンプレッサとの組合せ（シングルシステム）の冷凍能力は、22型クライオポンプ「CRYO-U22B」「CRYO-U22BL」の性能を十分に満足し、実機装置においても問題なく使用できている。そのため、開発目標としては、2台マルチシステムにおいても、1台当たりの冷凍能力が、シングルシステムと同性能1段120 W/80 K、2段15 W/20 Kを有することとした。

5. クライオポンプシステムの設計方針

22型クライオポンプ「CRYO-U22B」「CRYO-U22BL」の設計は完成されているので、冷凍機の変更により排気に関係する要素部品である80 Kバッフル、80 Kシールド、15 Kクライオパネルの基本構造を変更せず、既存の冷凍機から新型冷凍機の置き換えを行うこととした。冷却性能が維持されていた場合には、原理的に排気速度、排気容量は変化しない。冷凍機の変更でクライオポンプの性能に影響を与える項目は、冷却時間、

最大流量、交差圧力となるが、冷凍能力が同性能の場合には、上記3項目も変わらないので、冷凍能力が同性能とし、クライオポンプの性能が変わらないことが理想である。

6. 冷凍機の設計方針

6.1 冷凍機膨張室

2段の膨張室を現行より約34%大きくし、1段の膨張室は現状維持とした。大型装置に使用される20 m以上の長尺のフレキホースと大型コンプレッサの採用により冷媒であるヘリウムガス量が期待されるため、1段の膨張室は変更しなくても性能は現状維持ができると想定した。そのため2段性能を向上させるために2段の膨張室容積を大きくすることとした。

6.2 シール構造

GM冷凍機は、1段・2段とも断熱膨張で低温に冷却したヘリウムガスが、室温、又は1段温度と混合しないようにシールを使用して各部の温度を維持している。

当社の従来型クライオポンプ用冷凍機の2段側のシールの構造はピストンリング方式で、物理的にシリンダーとディスプレイサにシールリングを一定の面圧で接触してシールしている。しかし、新規設計は膨張室が大きくなっているため、ピストンリング方式を採用した場合にシールの周長が長くなり、シール性に懸念がある。そのため4K冷凍機ですでに採用している、ディスプレイサの外径とシリンダーの内径の間に狭い空間を設けて、そのクリアランスのコンダクタンスを小さくして、流体の流れを制限するクリアランスシールを採用した。メリットとしては設計的にボア径を変更してもクリアランスが所定の範囲に設計されていればシール性は担保される。また、寿命が長いことがあげられる。デメリットとしては、コストが高いことである。熱収縮率の関係でディスプレイサをシリンダーと同じ金属材料にして、低温時もクリアランスを一定に保つ必要がある。ディスプレイサを金属材料で精密に製作し、金属同士の接触防止のためコーティングする。従来は安価な樹脂でディスプレイサを製作していたので、否応なしにコストは上昇する。

6.3 バルブの開閉タイミング

冷凍機は膨張室で断熱膨張するため、機械的なバルブを内蔵している。コンプレッサから供給されるガスを吸入する吸入バルブと断熱膨張後にガスをコンプレッサに戻す排出バルブをそれぞれ搭載している。これ

らはポペット式のバルブで、ディスプレイサの運動タイミングと同期しており、ディスプレイサの位置に合わせてバルブの開閉タイミングが決められている。この開閉タイミングは、ディスプレイサ内部で熱交換する蓄冷材の圧力損失や膨張室の大きさといった要素を考慮して決定される。

新型機は膨張室で使用するヘリウムガス量は増加するので、コンプレッサから大量のヘリウムガスを冷凍機に供給できるようにバルブの開閉タイミングを設定することが良と考える。しかし、最小の開時間で最大性能が得られるバルブタイミングをシミュレーションで見出した。この調整により、適切なガス量で冷却性能が得られるため、コンプレッサの負荷を抑え、消費電力を低減することが可能になる。

6.4 新型冷凍機の試験結果

「RM120ET」冷凍機と新型機「RM150ET」冷凍機の性能試験結果をTable 2に示す。1段は11%、2段は27%性能が向上した。

RM150ETは2段の膨張室が大きくなっているため、ヘリウムガスの流量不足が想定されていた。そのためコンプレッサの運転周波数60 Hzを標準とし、50 Hzの時より凡そ1.2倍のヘリウムガスを供給できるようにしている。

Table 2 Comparison of refrigerator system in single operation

	Conventional type	New Type	Ratio
Model	RM120ET	RM150ET	
1st 80K	120W	133W	1.11
2nd 20K	15W	19W	1.27
1st 0W	34.0K	37.5K	—
2nd 0W	7.1K	6.0K	—

7. コンプレッサの設計方針

冷凍機の膨張室が大きくなったため、従来よりも大量の冷媒であるヘリウムガスが必要となる。冷凍機2台を1台のコンプレッサで運転するため、さらに必要性が増す。

冷凍機の性能は基本的には差圧と膨張室の容積で決定され、そこから各種の熱損失を差し引きしたものとなる。

ヘリウムガス量が少なければ冷凍機の基本性能を決定する差圧が小さくなり、性能は向上しない。そのためコンプレッサを大型化して冷凍機にさらに大量のヘリウムガスを供給する。従来のコンプレッサと同様に



Table 3 Comparison of refrigerator system in Multiple operation Performance per cold head

	Conventional type Single	New Type Multiple	Ratio
Cold head Model	RM120ET	RM150E × 2	
Compressor Model	C30PVRT	C100L	
1st 80K	120W	120W	1.00
2nd 20K	15W	12W	0.86
1st 0W	34.0K	33.5K	—
2nd 0W	7.1K	7.1K	—
Consumption power/ Cold head	6.0kW	4.2kW	0.70

スクロール型のヘリウムコンプレッサではあるが、標準的にインバータ駆動が可能であり、運転周波数60 Hzを標準とすることが可能となる。フレキホースの長さや充填圧力の調整で、コンプレッサの吸込み圧力を上げると、従来比で最大2倍の流量を確保できるコンプレッサを採用している。但し、コンプレッサ本体には許容される運転圧力範囲があり、その範囲内で運用しない限りコンプレッサの信頼性は担保されない。

つまり、仮に吸込み圧力を上げたとしても、吐出圧力に上限があるため、上限値に達しない範囲で運用する必要があるという制約化での使用となる。

新型「RM150ET」冷凍機2台と新型「C100L」コンプレッサ1台の組み合わせと従来のシングルシステムとの性能試験結果の比較をTable 3に示す。

新型のシステムは、冷凍機1台当たりの性能を示し

ている。1段性能は同じ、2段性能は14%シングルシステムより劣っている。但し、クライオポンプ1台当たりのエネルギーの使用量は30%低減され4.2 kWとなった。

8. 現状の結果について

マルチシステムにした場合、供給されるヘリウムガス量が低下するため、冷凍能力が低下するのは物理的な現象であり、止むを得ないところがある。しかし、コンプレッサを新型機に変更することで性能低下率を14%に抑え、且つ冷凍機バルブタイミングの調整で消費電力を30%削減したことは成果があったといえる。再度、それぞれのディメンジョンの最適解を見出して目標達成を目指す。