

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

クローズドサイクル希釈冷凍機の圧縮機開発および 希釈冷凍機システム評価試験

篠崎 慶亮, 澤田 健一郎, 佐藤 洋一, 田中 洸輔, 杉田 寛之
満田 和久, 中川 貴雄

2017年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

クローズドサイクル希釈冷凍機の圧縮機開発および 希釈冷凍機システム評価試験

篠崎 慶亮^{*1}、澤田 健一郎^{*1}、佐藤 洋一^{*1}、田中 洸輔^{*1}、杉田 寛之^{*1}、
満田 和久^{*2}、中川 貴雄^{*2}

Keisuke Shinozaki^{*1}, Kenichiro Sawada^{*1}, Yohichi Satoh^{*1}, Kohsuke Tanaka^{*1},
Hiroyuki Sugita^{*1}, Kazuhisa Mistuda^{*2} and Takao Nakagawa^{*2}

Abstract

宇宙を観測する宇宙科学ミッションなどで使われる高感度観測装置は、微弱な電磁波を高精度に捉えられるよう、検出信号の雑音（特に熱雑音）を低減させる必要がある。そのため、検出器を絶対零度（約 -273°C ）近くまで冷却して動作させる。宇宙用希釈冷凍機は、このような高感度観測装置に求められる 100 mK という極低温を、宇宙空間において無磁場かつ高い冷凍能力（オープンサイクル式の 100 mK での冷凍能力 $0.1\text{ }\mu\text{W}$ に対して、 50 mK にて 10 倍の $1\text{ }\mu\text{W}$ ）を獲得し、同時に軽量化（オープンサイクル式用冷媒タンクが不要）と大幅な長寿命化（ $1.5 \rightarrow 5$ 年）を可能とする。

本研究は、クローズドサイクル希釈冷凍機（CCDR：Closed-Cycle Dilution Refrigerator）の実現に必須となる、冷媒であるヘリウム 3 を低圧で循環するための圧縮機システムの開発と、フランスと共同で構築したクローズドサイクル希釈冷凍機システムのシステム評価試験を 2 つの柱としている。特に後者は、 100 mK 以下において高い冷凍能力を長寿命に作り出す次世代の宇宙用冷凍機として、フランスの研究機関と協力しながら進めた世界初の技術実証となった。

2015 年 5 月にフランスにて行われた地上技術実証では、本実験設計上の最低到達温度である 70 mK を達成し、冷凍能力などの冷却特性評価試験も追加で行うことができた。また、測定結果に基づいた解析により、 50 mK での冷凍能力 $1\text{ }\mu\text{W}$ を実現するための設計解を得ることができ、当初の目標を達成することができた。

本稿では、2011 年度より宇宙航空研究開発機構研究開発部門第二研究ユニット（旧研究開発本部熱グループ）が中心に進めた、ヘリウム 3 循環圧縮機システムの研究開発、およびクローズドサイクル希釈冷凍機システムのシステム評価試験についてまとめる。第 1 章では研究開発の背景となる、宇宙用機械式冷凍機の研究開発の意義や、クローズドサイクル希釈冷凍機の研究開発の意義について述べる。第 2 章では、希釈冷凍機の基本原理や求められる冷凍能力、それより求められるヘリウム 3 循環圧縮機システムの目標性能についてまとめる。第 3 章および第 4 章では、試作された圧縮機システムの設計製作や単体性能評価試験結果について述べる。最後に、第 5 章ではフランス担当の低温部と組み合わせたシステム評価試験結果についてまとめている。

* 平成 28 年 12 月 15 日受付（Received 15, December, 2016）

^{*1} 研究開発部門第二研究ユニット（Research Unit II, Research and Development Directorate）

^{*2} 宇宙科学研究所 宇宙物理学研究系（Department of Space Astronomy and Astrophysics, Institute of Space and Astronautical Science）

Contents

0.1	Abbreviations and acronyms	5
1	研究開発の背景および目的	6
1.1	宇宙用機械式冷凍機の研究開発	6
1.2	断熱消磁冷凍機と希釈冷凍機	6
1.3	宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の研究開発	9
2	クローズドサイクル希釈冷凍機システムの構成と目標性能	11
2.1	希釈冷凍機の冷却原理	11
2.2	クローズドサイクル希釈冷凍機に求められる冷凍能力	12
2.3	ヘリウム 3 循環圧縮機システムに求められる性能	
2.3.1	初期の冷却試験 (F.Martin et al. Cryogenics 2010)[1]	12
2.3.2	2011 年のフランス側冷却試験結果	14
2.3.3	2012 年のフランス側冷却試験結果	14
2.3.4	要求吸込圧	14
2.3.5	要求作動ガス流量	15
2.4	ヘリウム 3 循環圧縮機システムの目標性能のまとめ	15
2.5	想定される冷凍機システム	16
3	ヘリウム 3 を循環する圧縮機システムの設計製作	17
4	ヘリウム 3 を循環する圧縮機システムの性能評価	20
5	希釈冷凍機システムのシステム評価試験	22
5.1	Test 1 : 100 mK にて Helium-3 循環運転を地上用循環 pump から圧縮機へ切り替え ..	22
5.2	Test 2 : 1 K 以上から冷却	24
5.3	Test 3 : 15 K 以上から冷却	24
6	まとめ	27
A	システム評価試験ログ	28
B	発表資料 “Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system” , 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, Japan (2015)	29
C	発表資料 “宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実現に向けたヘリウム 3 循環圧縮機の開発結果” , 第 59 回宇宙科学技術連合講演会 3M16 (2015)	43
D	発表資料 “Dilution option : Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system” , B-mode from space, Univ. of Tokyo, Japan (2015)	51

0.1 Abbreviations and acronyms

1K-JT	1K-class Joule Thomson cooler
2ST	Double-stage Stirling cooler
4K-JT	4K-class Joule Thomson cooler
ADR	Adiabatic Demagnetization Refrigerator
AXAF	Advanced X-ray Astrophysics Facility
BBM	Bread Board Model
CCDR	Closed-Cycle Dilution Refrigerator
CNES	Centre national d'études spatiales
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
FP	Fountain pump
HX	Heat Exchanger
MC	Mixing Chamber

1 研究開発の背景および目的

1.1 宇宙用機械式冷凍機の研究開発

宇宙機において望遠鏡や観測装置を冷却する技術は、より遠くあるいは微弱な観測対象に対してより詳細な観測を可能とし、宇宙科学衛星の観測技術を決めるキー技術となっている。また、地球観測衛星や惑星探査機においては、高感度赤外センサの信号の熱雑音を抑えるために必須の技術である。宇宙開発の黎明期では、宇宙機における冷却といえば液体ヘリウムなどを用いた寒剤冷却で、バス部を上回る大きな寒剤タンクを設計し、打ち上げ直前まで蒸発を抑えようとする複雑な運用を強いられながら充填作業を続け、それでも観測寿命は1~2年足らずがほとんどであった。無寒剤の機械式冷凍機の開発は、ミッション部の軽量化と長寿命化を望めば当然の流れといえる。

宇宙航空研究開発機構 研究開発部門では、この高感度観測装置の最重要技術の一つである極低温冷却技術において、世界最高の熱効率(入力電力 / 生成温度における冷凍能力)を誇る無寒剤の機械式冷凍機(2段スターリング冷凍機、ジュールトムソン冷凍機)を研究開発してきた[2, 3, 4]。これらの冷凍機を組み合わせた冷却システムにより、最先端宇宙科学ミッションの競争力はさらに高まり、また、システムの小型化、低コスト化、長寿命化にも有効なことから、今後も宇宙科学ミッションへの大きな貢献が期待される。

1.2 断熱消磁冷凍機と希釈冷凍機

100 mK 以下を作り出す主要な冷却手段としては、磁気冷凍の一つである断熱消磁冷凍と、ヘリウムを用いた希釈冷凍の2つがある。

断熱消磁冷凍機(Adiabatic Demagnetization Refrigerator = ADR)は、極低温における常磁性体の磁気的な状態変化を利用し、磁場を用いたカルノーサイクルで低温を作り出す冷却手段である。ADRは主に磁性体カプセル(pill)、磁性体に強磁場をかけるための超伝導マグネット、熱浴と磁性体との間の熱的 On/Off を作り出すヒートスイッチの3要素で構成され、とてもシンプルな構造となる。地上用の冷却手段としては、希釈冷凍機が大きく普及するにつれて、研究分野として衰退した時期があった。その後、米国の AXAF (Advanced X-ray Astrophysics Facility) 計画において宇宙空間で 100 mK 以下を作り出す冷凍機の検討が始まり、ADR は原理的に重力の影響を受けない宇宙用冷却技術として再び注目された [5, 6]。

ADR が初めて宇宙機に搭載されたのは、日本で5番目のX線天文衛星すざく(Astro-EII、2005年打上げ)である[7, 8]。これは、それまで衛星搭載されていたX線CCDなどの検出器よりも10倍以上優れたエネルギー分解能を持つ半導体型X線マイクロカロリメータを極低温で動作させるために用いられ、世界で初めて宇宙空間で人工的に60 mKを作り出すことに成功し

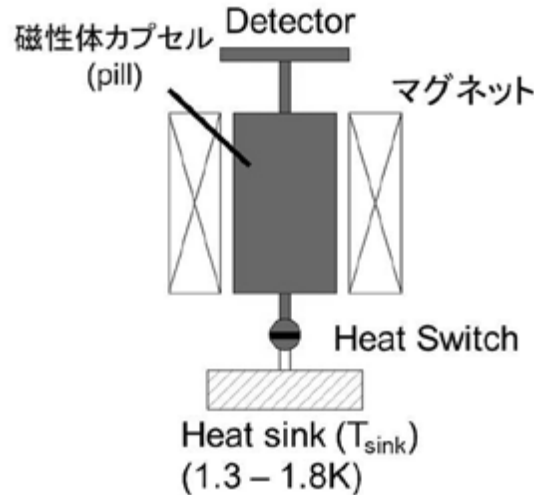


Figure 1: 断熱消磁冷凍機 (単段式) の概念図。

た。また、宇宙用として近年では多段式 ADR が主流になりつつある。2016 年に打ち上げられた日本で 6 番目の X 線天文衛星ひとみには、上記の半導体マイクロカロリメータの冷却のために 3 段式 ADR が搭載され、軌道上にて 50 mK の生成に成功している [9, 10, 11]。また、多段式の各段の冷却サイクルを交互に行い、連続的に 100 mK 以下を作り出す連続型 ADR が研究開発されている [12]。これにより、リサイクル時間という Dead time (観測ができない時間) が消えると同時に、冷凍能力向上ももたらしことができ、地上の冷却手段としても期待がかかる。

希釈冷凍機は、1 K 以下の混合室 (Mixing chamber) にて、ヘリウム 4 (^4He) とその同位体であるヘリウム 3 (^3He) の比率が異なる 2 相間で ^3He が移動することにより、吸熱反応が起こって冷却が行われる。ADR の冷凍能力の限界を決めている最大の要因は、冷媒が液体あるいは気体ではなく固体である点である (これは高い温度安定性を作り出すためには利点でもある)。したがって、希釈冷凍機は、地上においてはクライオスタット外部に冷媒であるヘリウムの貯蔵タンクを設け、タンクから低温部へ気体ヘリウムを循環させることで、ADR より高い冷凍能力を容易に作り出すことができる。

しかし、希釈冷凍サイクルでは、d 相 (dilute phase、6.6 %の ^3He と 93.4 %の ^4He) 中の ^3He を選択的に抽出し循環させるために、混合室の中で ^3He のみとなる c 相 (concentrated phase) と d 相を分離させる必要があり、地上用冷凍機における通常の方法では重力を利用している。さらに、大きな高圧貯蔵タンクの搭載は、衛星システム設計にとって大きなインパクトである。

宇宙背景放射観測衛星 Planck に搭載されたオープンサイクル希釈冷凍機は、「重力利用」という壁を越えて宇宙用希釈冷凍機を実現した最初の衛星である [13, 14, 15, 16]。本冷凍機では混合室において、重力の代わりに配管の毛細管力を利用している。室温である Service module

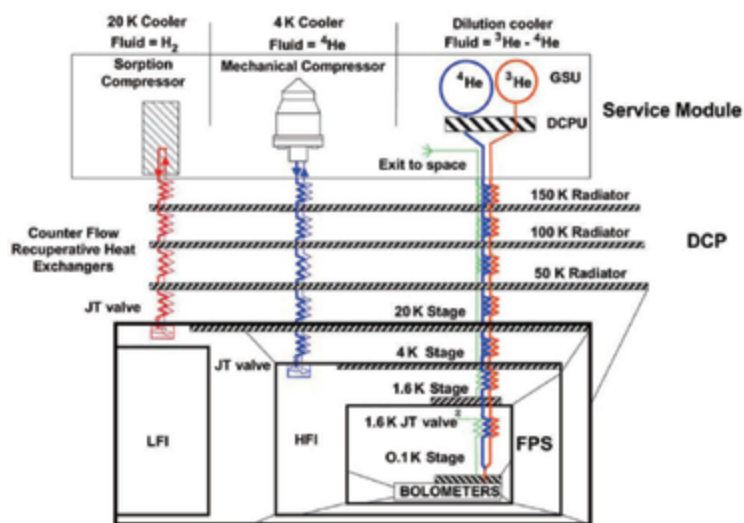


Figure 2: 宇宙背景放射観測衛星 Planck に搭載された Service module から検出器ボロメータまでの冷却システム [13]。

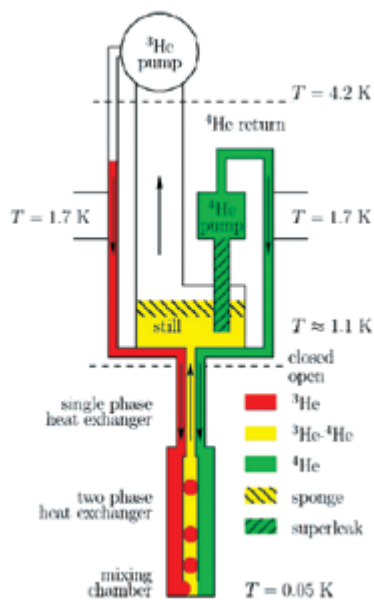


Figure 3: クローズドサイクル ^3He - ^4He 希釈冷凍機概念図 [1]。

から検出器ボロメータまでの冷却システムを図 2 に示す [13]。冷媒であるヘリウムは、別に用意されたジュールトムソン冷凍機によって 4.5 K に予冷され、さらに混合室から伸びる Return 配管中のヘリウムガスを用いたジュールトムソン冷却により、1.6 K 未満に予冷される。室温部には 4 台の貯蔵タンク (1 台あたりの体積 51 ℓ) が設けられ、冷媒であるヘリウムは 1 タンクあたり約 10,590 ℓ 搭載される。これにより、100 mK にて 0.1 μ W の冷凍能力を得るための流量 (^4He 22.5 $\mu\text{mol/sec}$ 、 ^3He 7.5 $\mu\text{mol/sec}$) を実現する。

Planck に搭載されたオープンサイクル希釈冷凍機は、分留室 (Still) や複雑なポンピング技術を利用せず、機械的動作を持つこと無く 100 mK の実現に成功している。ただし、希釈冷凍プロセス後の ^4He および ^3He は宇宙空間へ排出する設計となっている。冷凍能力は流量で決まるため、よって、搭載可能なヘリウム貯蔵量が決めれば、冷凍能力と運用寿命の両立が困難となる。これより、ヘリウムを循環させるクローズドサイクル希釈冷凍機 (CCDR : Closed-Cycle Dilution Refrigerator) が次のステップとなる [1, 17, 18]。

概念図を図 3 に示す。主要な要素技術としては、 ^3He 循環ポンプ、 ^4He 循環ポンプ、分留室、約 1.7 K の予冷温度領域、熱交換器および混合室となっている。 ^3He の気体-液体間の相分離は、ソープション冷凍機などで実績のあるポーラススポンジを分留室に導入して行う [19]。 ^4He は分留室温度領域ではほぼ全て液体となっているが、この ^4He の循環には、ポーラスプラグを用いて熱機械効果により超流動 ^4He のみが循環する Fountain pump (FP) を用いる。かわって ^3He は分留室温度領域にてほぼ全て気体のため、室温に設けられた圧縮機を用いたガス循環が考えられる。

フランスの CNRS (Centre national de la recherche scientifique = フランス国立科学研究センター) を中心に行われたプロトタイプの実験では、60 mK にて 1 μ W の冷凍能力を作り出すことに成功した [17]。しかし本クローズドサイクルの実現には、1 kPa 未満の低い吸込圧を作り出す ^3He 循環圧縮機が必要であること、1.5 K 前後にて十分な冷凍能力を持った予冷機が必要であることが指摘された。

1.3 宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の研究開発

上記のような背景を元に、研究開発部門では、1.7 K を生成する 1K 級ジュールトムソン冷凍機 (1K-JT) よりもさらに低温である 50 mK を生成する冷凍機として、クローズドサイクル希釈冷凍機システムを、フランスの CNES (Centre national d'études spatiales = フランス国立宇宙研究センター)、CNRS および Air Liquide 社と協力して研究開発した [20, 21, 26]。各担当の要素技術を図 4 に示す。

クローズドサイクル希釈冷凍機の実現には、Planck で実現した技術に加え、超流動 ^4He と ^3He を分離する分留室 (Still) や超流動 ^4He を循環する Fountain pump、および ^3He を循環する

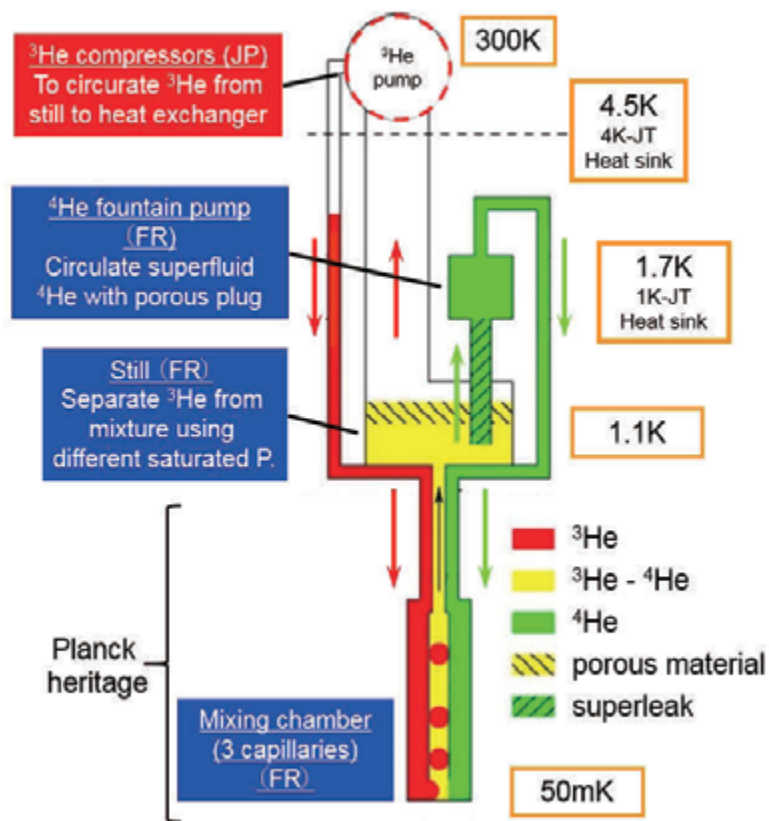


Figure 4: フランスと協力して進めるクローズドサイクル希釈冷凍機概念図および各機関の担当部分。JP：日本が新規開発を担当、FP：フランスが新規開発を担当。予冷温度 1.7 K および 4.5 K は、日本のジュールトムソン冷凍機を前提としている。

圧縮機が必要である。特に ^3He 圧縮機は、圧縮機開発が得意技術である日本の参加によって早期実現が期待できることから、 ^3He 圧縮機の研究開発を日本、分留室など低温部をフランスが担当する形で協力して進められた。なお、このクローズドサイクル希釈冷凍機には、1.5~1.8 K 程度の予冷温度が必要であり、1.7 K を実現する日本の 1K-JT を使用する前提で研究開発が進められた [4]。

2 クローズドサイクル希釈冷凍機システムの構成と目標性能

2.1 希釈冷凍機の冷却原理

^3He - ^4He 希釈冷凍法の原理は以下の通りである。50 %濃度の He 同位体混合液を冷却していくと、約 1.3 K で ^4He が超流動状態になり、約 0.8 K で ^3He の c 相と d 相に相分離され、さらに低温では c 相は純 ^3He に、d 相は約 6.6 % の ^3He を含んだ状態に近づく。ここで、d 相の ^3He 溶解量が絶対零度においても 6.6 % 持っている点が、100 mK 未満の極低温において高い冷凍能力を持つ希釈冷凍機を可能としている。 ^3He - ^4He 希釈冷凍機では、c 相と d 相が接しており、冷却生成する部分は混合室 (MC: Mixing Chamber)、相分離する部分は分留室 (Still) と呼ばれる。分留室温度 (約 0.8K) では、 ^4He の蒸気圧はほぼ 0 で、 ^3He の蒸気圧は有限のため、 ^3He を選択的に蒸発可能であり、d 相の ^3He 濃度が平衡状態より低くなる事で c 相から d 相へ ^3He が溶解し、この時のエントロピー差を利用することで、混合液から潜熱を奪って冷却が発生する。

あらためて図 4 を見てみる。混合室にて混合冷却された混合液は、分留室にて ^3He ガスを多く含む混合ガス (10 %程度の液体 He を含む 90 %以上の ^3He ガス) を選択的に ^3He ポンプにて蒸発循環させるようにし、かわって残りの ^4He は FP (Fountain Pump) によって循環される。両者の循環配管は 1K pot (図上 1.7 K 部分) にて冷却され、更に分留室と熱交換した上で最終的には混合室出口配管と熱交換され、混合室にて混合される。

以下に個々の要素の詳細を記す。まず混合室だが、地上のように重力を利用して、密度差によって冷却界面を生成する事は出来ないため、宇宙用では毛細管力を使用している [1, 17, 18]。ヘリウム同位体を Y 型分岐管に通して 1 つの毛細管を通過させる際に、毛細管力が重力分離と同じ役割を担い、d 相と c 相が分離される。その後、c 相から d 相への ^3He の移動に伴い冷却が発生する。FP は、 ^4He が超流動状態になる 2.17 K 以下で駆動させ、分留室と接続されたスーパリーク間で低温側から高温側 (FP 本体) へと温度差分だけ超流動 ^4He が流れる熱機械効果を利用している。よって、 ^4He 流量の大きさはヒータを用いた FP 内温度差で制御される。1K pot は、本システム評価試験の地上技術実証では、4.2 K の液体 He タンクと細管で接続し、減圧することで蒸発冷却により 1.3 K~1.8 K の温度を生成する。本温度領域は、実際の宇宙機では冷凍機にて予冷を行う予定で、1.7 K を生成できる 1K-JT が筆頭となる。分留室は、重力に依存しない分離方法として、多孔質材の空隙の部分に毛細管力を用いて混合液を保持させており、 ^3He 循環圧縮機が作り出す低圧力に合わせて、ヒータ熱負荷を制御することで最適な温度を保つ。分留室内の典型的な圧力は 0.5~1.0 kPa で、温度は 1.1~1.3 K (希薄混合液中の ^3He 濃度が 10 %以上) で最適な駆動状態となる。

上記の圧力を達成しつつ、希釈冷凍機の冷凍能力を決定する重要な要素が ^3He 循環圧縮機であり、低い吸込圧かつ大きな流量が要求され、開発当初は宇宙用としてその要求に応える圧縮

機は存在しなかった。Planck で実証された技術に加えて、クローズドサイクル方式を実現するための新規技術としては、 ^3He 循環圧縮機以外には分留室や FP となり、これら低温部はフランスが担当している。 ^3He 循環圧縮機については、2009 年頃に欧州側が日本の冷凍機用圧縮機に注目し、日本側が研究開発に着手した。

2.2 クローズドサイクル希釈冷凍機に求められる冷凍能力

次世代の X 線天文衛星に搭載されるマイクロカロリメータは、原理的に動作温度でエネルギー分解能 (カロリメータの最も重要な性能) が決まるため、「動作温度 50 mK」という要求を満たすことは必須となる。当然ながら接触熱伝導などにより、熱浴よりも検出器は若干高温となるため、冷凍機の要求生成温度は 50 mK より低くなる。これより希釈冷凍機の目標温度は 45 mK となっている。

一方で冷凍能力については、カロリメータの自身の発熱は現実的な数字として a few hundred nW¹ 程度である。これに配線熱伝導を足してマージンを取った値が、50 mK に対する要求冷凍能力となる。よって要求される冷凍能力は、予冷系温度に強く依存する。

希釈冷凍機は分留室 – 混合室 (50 mK) 間の熱交換部に大きな吸熱能力があり、ここを検出器配線系の熱アンカー部として利用することができるため、断熱消磁冷凍機と比べ、より小さな冷凍能力で済むと予想される。

2.3 ヘリウム 3 循環圧縮機システムに求められる性能

クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機に求められる性能としては、吸込圧および作動ガス流量が最も重要である。本項では、フランス担当の低温部の冷却試験結果より、圧縮機に求められる吸込圧および流量について述べる。

2.3.1 初期の冷却試験 (F.Martin et al. Cryogenics 2010)[1]

図 5 は、2010 年に Cryogenics に掲載された希釈冷凍機の冷却試験結果における、各分留室内圧力における到達温度と冷凍能力の関係である [1]。この希釈冷凍機プロトタイプは目標性能が冷凍能力 1 μW (50 mK) となっているため、この目標を満たすための分留室、混合室、FP、Capillary の設計となっている。

図 5 より、吸い込み圧 673 Pa の時に冷凍能力 1 μW が得られる到達温度は 74 mK となり、吸い込み圧 18 Pa まで下げた時の冷凍能力 1 μW が得られる到達温度は 57 mK となっている。横軸が 0 K² の時にマイナスになっているのは、自身の熱負荷によるもので、この系では Parasitic

¹ もちろん検出器の pixel 数によるが、検討されている妥当な pixel 数より参照。

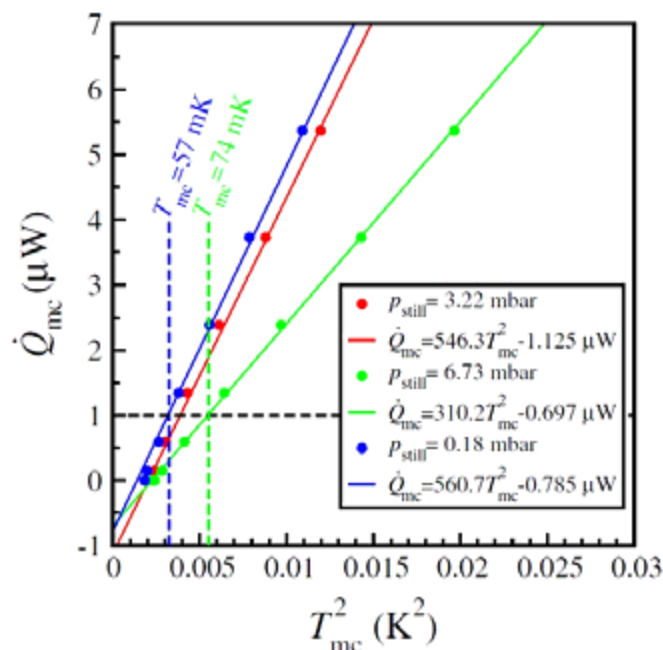


Figure 5: Experimental results of closed cycle dilution cooling tests in 2010 [1]. Blue : 18 Pa, Red : 322 Pa, Green : 673 Pa.

な熱負荷が $1 \mu\text{W}$ 程度あること、45 mK 程度が最低到達温度 (自身を冷やすだけで、冷凍能力はない) であることが分かる。

P_{still} (Pa)	\dot{n}_3 ($\mu\text{mol}/\text{sec}$)	\dot{n}_4 ($\mu\text{mol}/\text{sec}$)	$\dot{Q}_{1.35\text{K}}$ (mW)	\dot{Q}_{still} (mW)
322	16.4	127.2	3.05	0.71
673	14.7	85.4	2.10	1.03
18	11.2	134.1	2.52	0.18

Table 1: Experimental results of flow rate and estimated heatloads [1].

各吸込圧における、 ^3He および ^4He の流量と 1.35 K 予冷器に対する熱負荷および分留室 (still) のヒータ熱負荷の関係を表 1 に示す。4.2 K から 1.35 K まで ^3He を冷却するために奪うべき熱量は 0.5~1 mW と見積られるが、 $\dot{Q}_{1.35\text{K}}$ は明らかにこれよりも大きく、Fountain pump からの熱負荷を取り去るための予冷機がこの温度領域に必須であることが分かる。1KJT の生成温度も大変重要なことがこれだけでも分かる。

2.3.2 2011 年のフランス側冷却試験結果

吸込圧が低いほど到達温度が低く冷凍能力が高くなる。2011 年の冷却試験結果より、フランス側が提示した性能は、

- 20 $\mu\text{mol/sec}$ (60 $\mu\text{g/sec}$) 以上、0.5 kPa
- 30 $\mu\text{mol/sec}$ (90 $\mu\text{g/sec}$) 以上、1 kPa
- 60 $\mu\text{mol/sec}$ (180 $\mu\text{g/sec}$) 以上、1.5 kPa

となった。これは冷凍能力 1.6 μW (45 mK) を目指した時の要求値と思われるが、ただし上記の値は実験結果と詳細に比較すると少し足りない値に思われた。

2.3.3 2012 年のフランス側冷却試験結果

上記とは別で、分留室圧力を変えた時の冷凍機性能の影響が調べられている。これによると

- <0.5 kPa : 冷凍機は分留室圧力に大きな影響を受けない。
- $0.5 < P_{\text{still}} < 1$ kPa : 冷却性能が分留室圧力に合わせて劣化する。
- $1.0 < P_{\text{still}} < 1.5$ kPa : 冷却性能が不安定。

となり、少なくとも 0.8 kPa 以下でなければ安定した動作をしない、と予想される結果となった。

2.3.4 要求吸込圧

上記の議論より、50 mK にて冷凍能力 1 μW を達成するためには吸込圧 1 kPa あれば十分である。一方で比較として、冷凍能力 1.6 μW (45 mK) を得るには、吸込圧 30 Pa でもかなり厳しい条件であることが分かり、1 kPa では 1.0 μW 程度 (45 mK) が限界と考えられる。

一方、冷却性能が分留室内圧力に大きく影響を受けないようにするためには、0.5 kPa 以下が必要であり、圧損を考慮すると圧縮機吸込圧は 0.4 kPa 以下が必要となる (2.3.3 章参照)。

ただし要求される ^3He ガス循環系の室温部吸込圧は、分留室の制御温度および熱交換部に使用する Capillary の直径と長さを含めた圧損に依存する。今後の設計改良によって、吸込圧による冷凍能力依存性は改善される可能性がある。

ちなみに地上用の循環ポンプでは、典型値として 10 Pa 未満と思われる。

2.3.5 要求作動ガス流量

希釈冷凍は、c 相から d 相へ流れ込む ^3He のエンタルピー変化によって吸熱反応を作り出す。この時の冷凍能力 \dot{Q}_{mc} は ^3He の流量 \dot{n}_3 に比例する。もし \dot{n}_3 が十分ある場合、 ^4He の流量 \dot{n}_4 が冷凍能力を決めることになり、混合室温度 T_{mc} を用いて、

$$\dot{Q}_{\text{mc}} = 5.76 \dot{n}_4 T_{\text{mc}}^2 \quad (1)$$

と表される [1]。よって ^3He の流量が十分得られれば、直接は ^3He が冷凍能力に影響しなくなる。

式 1 が成り立つ時に 50 mK にて必要な \dot{n}_4 は、冷凍能力 1 μW では 70 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ となる。ただし実際の装置では 25 %程度の変動性があり [1]、これを考慮すると冷凍能力 1 μW では 100 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ 、1.6 μW では 160 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ 程度となる。 \dot{n}_4 を増やすには Fountain pump のヒータ熱量を増やす必要があり、1 K 温度領域の予冷系への熱負荷は増加する。

^3He の流量 \dot{n}_3 は、大きく見積もって \dot{n}_4 の 20 %とすると、冷凍能力 1 μW では 20 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ (60 $\mu\text{g}/\text{sec}$)、1.6 μW では 32 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ (96 $\mu\text{g}/\text{sec}$) 程度となる。

各生成温度および冷凍能力を要求した際に必要な \dot{n}_4 および \dot{n}_3 の値を表 2 に示す。注意すべきは、 ^3He にとってはこれが「最低必要な」流量であり、これを下回ると冷凍能力が下がるだけでなく、 ^3He が冷凍能力を決めることになり、同時に \dot{n}_3 の安定度が冷凍能力の安定性に影響を与えることになる。

T_{mc} (K)	\dot{Q}_{mc} (μW)	\dot{n}_4 ($\mu\text{mol}/\text{sec}$)	\dot{n}_3 ($\mu\text{mol}/\text{sec}$)($\mu\text{g}/\text{sec}$)
50	1.0	100	20(60)
50	1.6	160	32(96)
45	1.0	120	24(72)
45	1.6	183	37(111)

Table 2: 各生成温度および冷凍能力に対し必要とされる ^4He および ^3He の流量。

2.4 ヘリウム 3 循環圧縮機システムの目標性能のまとめ

上記より、ヘリウム 3 循環圧縮機システムに求められる吸込圧および作動ガス流量は以下にまとめられる。これらの見当結果より、吐出圧力などを含め、ヘリウム 3 循環圧縮機システムの目標性能は表 3 のように設定された。

1. 冷凍能力 1.0 μW (50 mK) の場合

- (a) 吸込圧 要求 0.8 kPa、目標 0.4 kPa。
- (b) ^3He 流量 20 $\mu\text{mol}/\text{sec}$ (60 $\mu\text{g}/\text{sec}$) 以上

2. 冷凍能力 $1.6 \mu\text{W}$ (45 mK) の場合

- (a) 吸込圧 30 Pa でも厳しい。
 (b) ^3He 流量 $37 \mu\text{mol}/\text{sec}$ ($111 \mu\text{g}/\text{sec}$) 以上

目標性能	
流量 (^3He)	$\geq 33 \mu\text{mol} / \text{sec}$
吸込圧力	$< 0.4 \text{ kPa}$
吐出圧力	$> 20 \text{ kPa}$
駆動電力	$< 80.0 \text{ W}$

Table 3: ヘリウム 3 循環圧縮機システムの目標性能。

2.5 想定される冷凍機システム

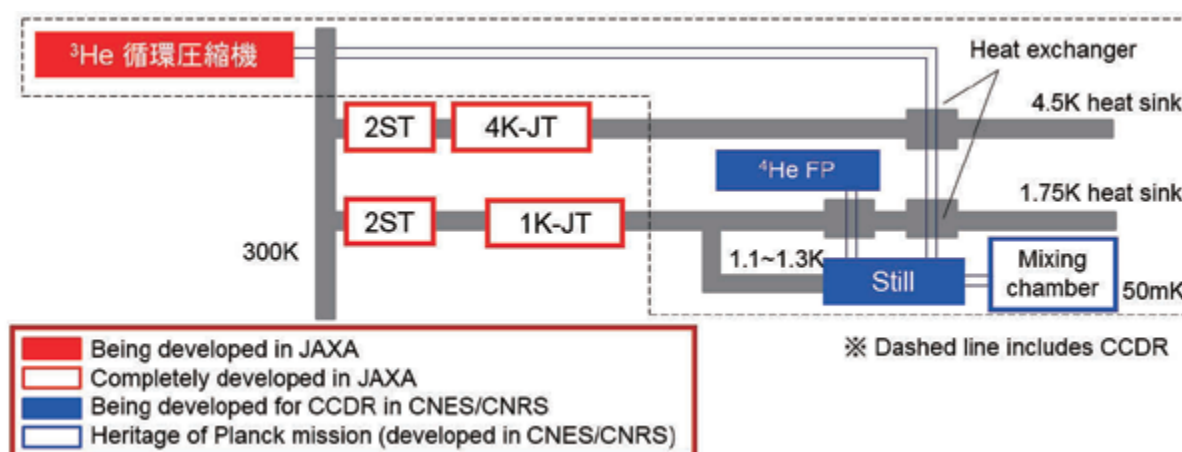


Figure 6: クローズドサイクル希釈冷凍機 (CCDR) を用いた典型的な冷凍機システム。点線内が CCDR となる。

希釈冷凍機は原理的に、室温から 100 mK 以下を直接生成できるものではなく、2 K 未満まで予冷が必要である。前述のように、クローズドサイクル希釈冷凍機の場合、1.5~1.8 K 程度の予冷温度を別途生成する必要がある。

クローズドサイクル希釈冷凍機を用いた場合の、典型的な冷凍機システムを図 6 に示す。点線で囲まれた部分が本研究開発のクローズドサイクル希釈冷凍機システムを表している。予冷機としては 1K-JT が必須と思われるが、実現性を考えると、侵入熱低減のために 4K 級ジュールトムソン冷凍機 (4K-JT) も必要と思われる。それより高い温度の中間温度領域は、各ミッションの条件によると思われる。

3 ヘリウム3を循環する圧縮機システムの設計製作

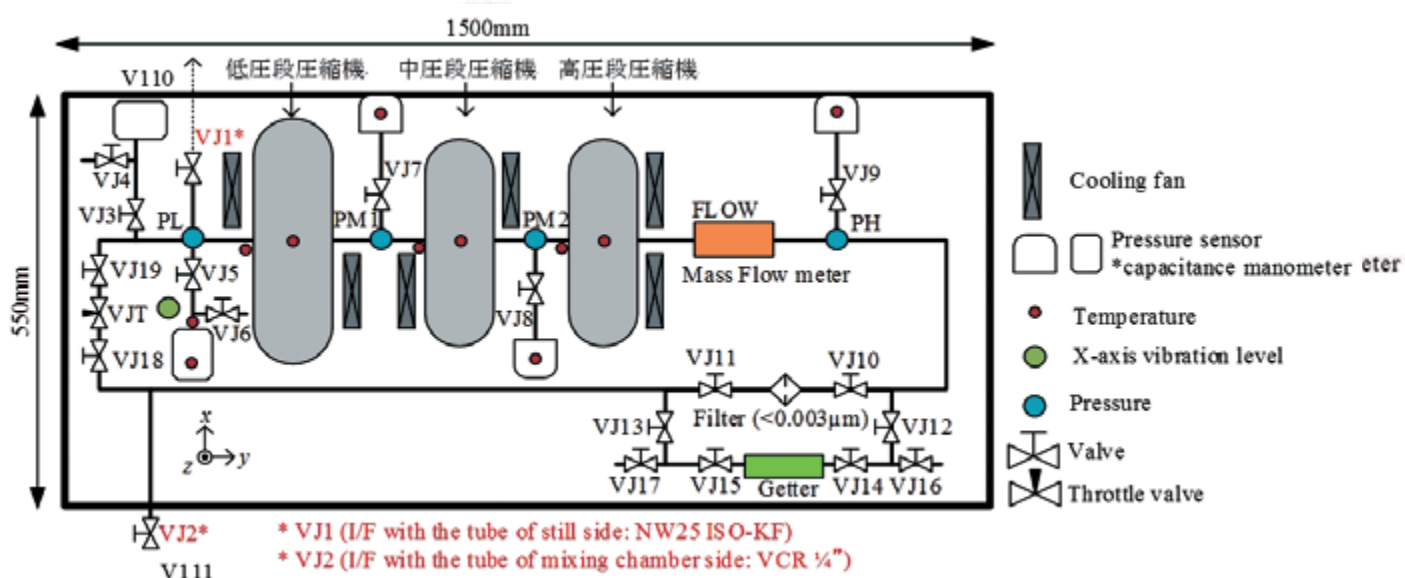


Figure 7: クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機システムの概念図。

圧縮機システムの研究開発は、1K-JT 冷凍機用圧縮機をベースとして開始した。1K-JT 冷凍機用圧縮機の吸込圧力は 8 kPa であり、宇宙用の圧縮機では最低圧力を有する。しかし、本研究開発の目標とするヘリウム 3 循環圧縮機は更に 1/10 以下の吸込圧力を達成する必要がある。非常に挑戦的な目標値という事がわかる。目標性能を達成するため、従来の圧縮比の実績（1 段あたり圧縮比 4）から、圧縮段数として 3 段を選定した。特に重要となる 1 段目の低圧段圧縮機においては、目標吸込圧力を達成するため、圧縮体積を大きくするために、従来よりも大幅に大きい直径 70 mm のピストンを使用した。一方で 2 段目（中圧段）と 3 段目（高圧段）については、従来のジュールトムソン冷凍機用圧縮機で実績のあるピストン直径 40 mm と 25 mm の圧縮機を用いた。圧縮機内部については、圧縮に要されないデッドボリュームの低減、圧力損失低減、更には到達圧力や過渡的な応答に影響する吸気／排気バルブの厚み最適化等を実施する事で性能改善を実施した。ヘリウム 3 循環圧縮機システムの概略図および外観を図 7 と図 8 にそれぞれ示す [22, 23, 24, 25]。本圧縮機システムは、圧縮機が閉ループで構築されており、各段の前後に高精度圧力計（バラトロン/MKS）を配置して圧縮比を計測している。更に圧縮機の下流では質量流量計（HFM-300/Teledyne Hastings Instruments）にて循環流量を計測している。流量は流量調整バルブ（VJT）にて絞り度を調整する事で制御可能である。質量流量計の下流では、不純ガスの吸着用のゲッターと不純物トラップ用のフィルターをバルブ切替えにて

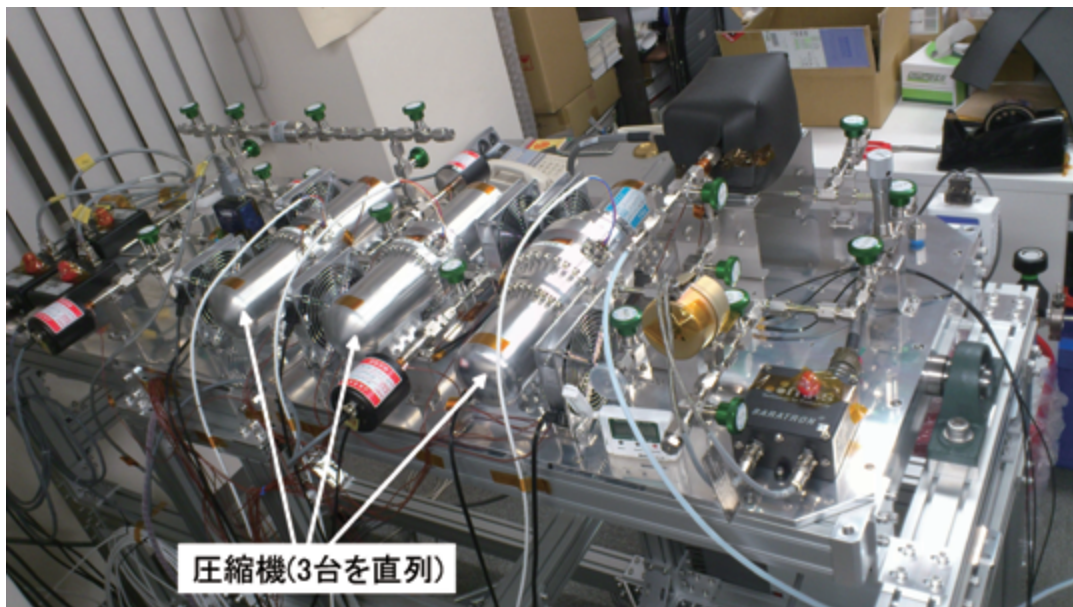


Figure 8: 試作したクローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機システム。

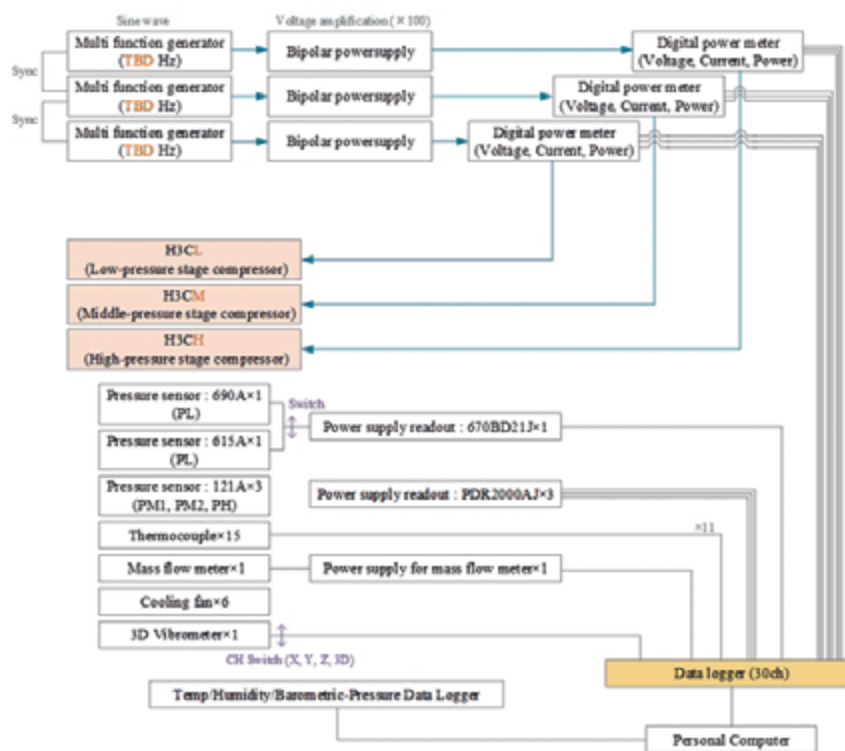


Figure 9: クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機システムの制御モニタの接続図。

選択可能となっている。その他のデータとして、低圧段圧縮機近傍の振動レベルを計測するために、圧縮機駆動軸方向（X 方向）の加速度の計測と各所の温度計測を実施している。本圧縮機システムの希釈冷凍機低温生成部との I/F は VJ1 と VJ2 になっており、VJ1 が分流器側配管と接続され、VJ2 が混合器側配管と接続される。ヘリウム 3 循環圧縮機システムの計測機器接続図を図 9 に示す。ファンクションジェネレータにて生成した正弦波をバイポーラ電源にて 100 倍に増幅し、電力計を介して圧縮機を駆動させている。データロガーでは上述の上記の圧力、温度、振動レベルに加え、電力計で取得された電圧・電流・電力データ等の全部で 29 点のデータを 1 Hz にて記録を実施する。

4 ヘリウム3を循環する圧縮機システムの性能評価

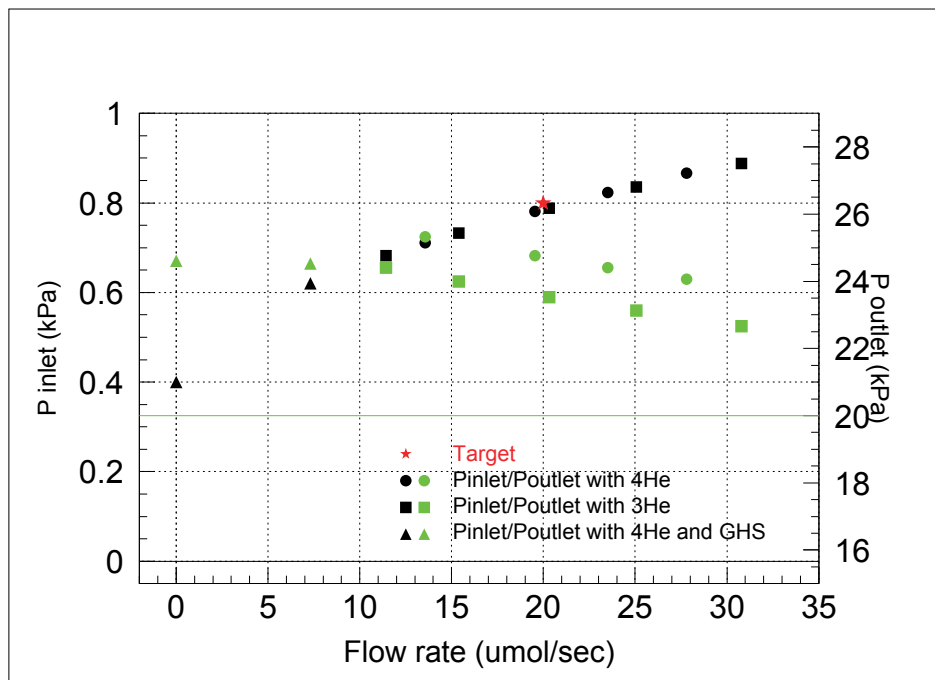


Figure 10: ヘリウム3循環圧縮機システムの単体評価試験結果。

試作したヘリウム3循環圧縮機システムについて、表3に示した目標性能を満足するかの単体性能評価試験を実施した。性能評価試験結果 (^3He 換算流量、吸込圧力 P_{inlet} 、吐出圧力 P_{outlet}) を図10に示す。 ^4He 充填時を丸、 ^3He 充填時を四角、フランス運搬後にフランス担当のガス制御システムと接続しながら ^3He 充填時の測定結果を三角で示している。全て駆動条件はほぼ同一である。 ^3He 充填時の方が小さな吐出圧力となっているが、これは熱物性差に起因する圧力損失の違いによるものであると考えられる。一方、吸込圧力は三者で大きな変化が見られず、約 $33 \mu\text{mol/sec}$ において 0.9 kPa 程度となっており、目標性能を満足する結果は得られなかった。充填圧力 (小さいほど基本的には吸込圧力が低い) や駆動周波数 (小さいほど電力は大きい) が吸込圧力が低い) 等の性能に影響するパラメータを変化させても、吸込圧力は当初目標を満足できなかった。その後、システム評価試験の実施可否に向けてフランス側と調整を行い、希釈冷凍機が駆動できる可能性がある性能として、表4に示すように新たな目標性能の設定を行った (図10の星のプロット)。これに対しては満足する結果が得られたため、本単体試験結果をもとにシステム評価試験を実施する事とした。なお、駆動電力は 35 W と、目標である 80 W 未滿を十分満足する事も確認できた。

フランスでのシステム評価試験の直前には、半日程度の連続駆動試験も行なった。この時の

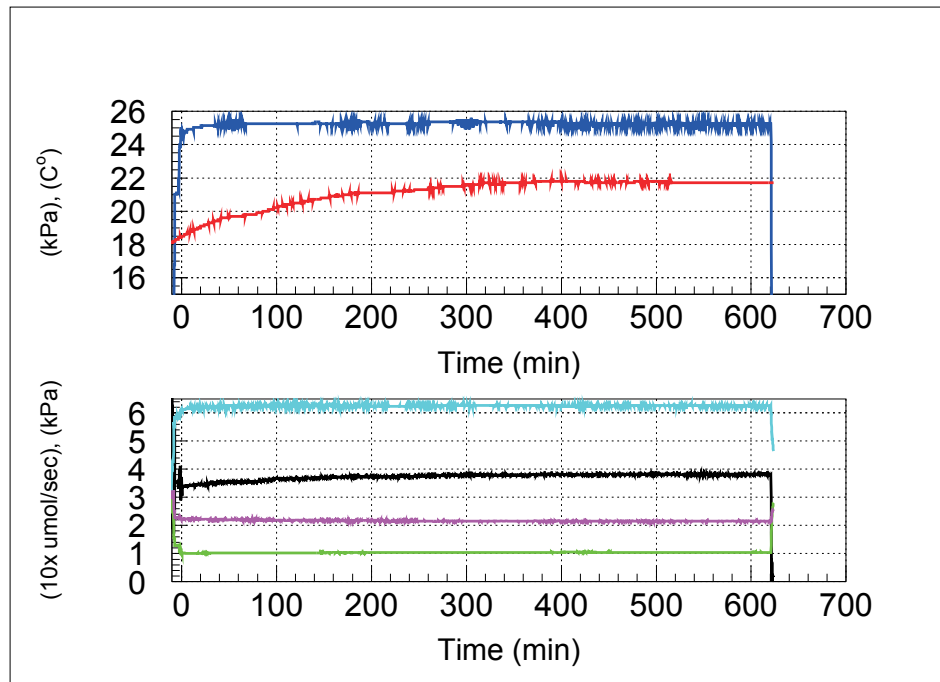


Figure 11: ヘリウム 3 循環圧縮機システムの単体評価試験結果。約 10 時間駆動した時の時間変化。赤：圧縮機テーブル温度、青：吐出圧力、黒： ^3He 換算流量、緑：吸込圧力、紫：低圧段圧縮機–中圧段圧縮機間の圧力、水色：中圧段圧縮機–高圧段圧縮機間の圧力。

	目標性能	試験結果
流量 (^3He)	$\geq 20 \mu\text{mol} / \text{sec}$ ($\geq 32 \mu\text{mol} / \text{sec}$)	$20 \mu\text{mol} / \text{sec}$
吸込圧力	$< 0.8 \text{ kPa}$ ($< 0.4 \text{ kPa}$)	0.79 kPa
吐出圧力	$> 20 \text{ kPa}$	21 kPa
充填圧力	-	2.8 kPa
駆動電力	$< 80.0 \text{ W}$	

Table 4: ヘリウム 3 循環圧縮機システムの単体試験結果。

測定結果を図 11 に示す。駆動を開始してから約 5 時間かけて、圧縮機の発熱により圧縮機を載せたテーブル温度がわずかに上昇していくに伴い、内部のガスも温度上昇に伴う緩やかな流量増加が見られる。そして、平衡温度に達した後は安定した動作を維持していることが確認された。

5 希釈冷凍機システムのシステム評価試験

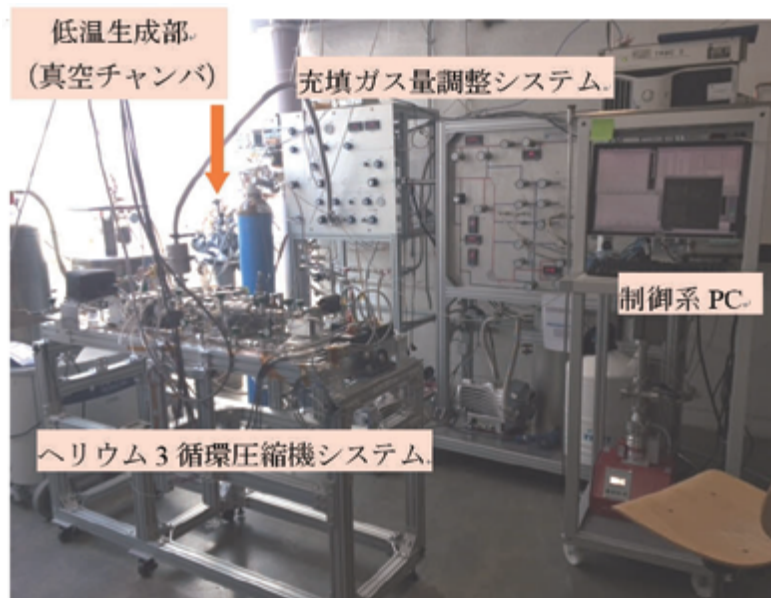


Figure 12: システム評価試験のセットアップの様子。

2015 年 4~5 月にかけて、フランス グルノーブルにある CNRS ニール研究所にて、日本担当のヘリウム 3 循環圧縮機システムとフランス担当の低温部を結合したシステム評価試験を実施した。フランス担当低温部との結合後の試験装置の概観図を図 12 に、低温部におけるデータ取得位置を図 13 に示す。システム評価試験は下記の 3 段階に分けて試験を実施した。

1. Test 1 : 70 mK 維持状態にて地上用ポンプから切り替える。
2. Test 2 : 低温部 1 K から希釈冷凍で冷却。
3. Test 3 : 低温部 18 K から希釈冷凍で冷却。

本システム評価試験で使用したフランス担当の低温部は、混合室への侵入熱などにより、地上用の循環ポンプを用いた場合でも最低到達温度は 70 mK であった。よって、システム評価試験としては、70 mK の到達維持が一つの指標となった。

5.1 Test 1 : 100 mK にて Helium-3 循環運転を地上用循環 pump から圧縮機へ切り替え

まずは、試作したヘリウム 3 循環圧縮機システムを用いた場合の希釈冷凍の性能への影響を最も直接測定できる方法として、70 mK 生成中に地上用循環ポンプから切り替える試験を行った。

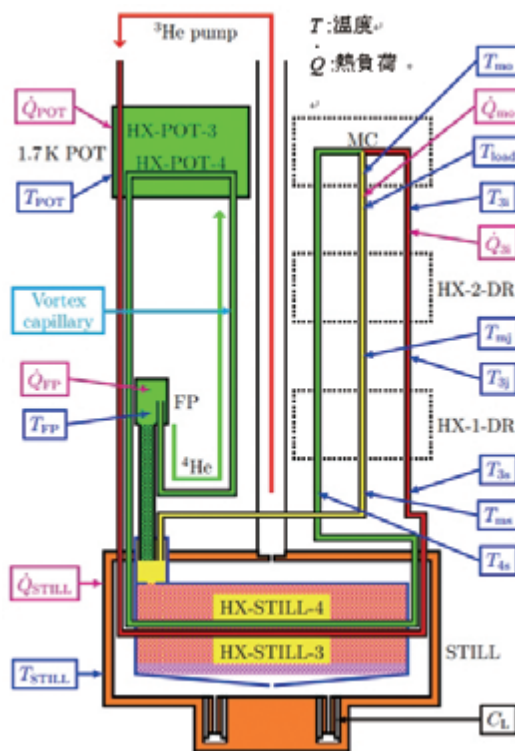


Figure 13: 希釈冷凍機システムの低温部の温度計設置箇所および熱負荷入力箇所。 ^4He 流路を緑、 ^3He 流路を赤、混合ガス流路を黄色で表す。MC が混合室。重力を用いずに動作することを実証するため、混合室は分留室 (still) より上部に位置している [20]。

	T_{mo} (mK)	T_{pot} (K)	^3He flow rate ($\mu\text{mol/sec}$)	P_{inlet} (PL)(kPa)	P_{outlet} (PH)(kPa)
2nd May	70 mK	1.34 K	22	0.8 kPa	12 kPa
6th May	70 mK	1.34 K	38.9	0.92 kPa	8.4 kPa
9th May	70 mK	1.34 K	25	0.83 kPa	6.7 kPa
12th May	70 mK	1.71 K	31	0.9 kPa	12 kPa
13th May	70 mK	1.71 K	34	0.9 kPa	12 kPa

Table 5: Test 1 の試験結果のまとめ。

試験結果を表 5 に示す。本試験時の熱浴温度 = 1K pot の温度 (図 13 の T_{pot}) は、希釈冷凍にとって比較的有利な条件である 1.34 K と、1K-JT が生成可能な温度の指標として 1.71 K の 2 種類行なった。結果として、計 5 回の試験で全て正常に動作し、70 mK を維持できることが確認された。

5.2 Test 2 : 1 K 以上から冷却

Test 1 の次のステップとして、混合室が 1 K 程度の状態から、ヘリウム 3 循環圧縮機システムを用いて希釈冷凍により 100 mK 以下を生成する Test 2 を行なった。こちらも 1K pot 温度が 1.34 K と 1.71 K の場合の 2 種類の条件で試験し、数回のパラメータ調整を経て、問題無く冷却できることを確認した。

5.3 Test 3 : 15 K 以上から冷却

Test 3 の冷却プロファイルを図 14~ 16 に示す。本冷却過程は、実際の衛星の冷凍機システムのように、常温から冷却していく過程を短い期間で確認するための模擬試験となっている。冷却プロセスとしては、低温部全体を 18 K 近傍まで昇温させた後、1K pot が 1K-JT で直接冷却されている状態を想定し、ヘリウム 3 循環圧縮機システムにて内部混合ガスを大流量で循環させ、1K pot と熱交換を行わせながら低温部を冷却していく。本試験では、冷却時間を短縮するため、ガス制御システムにて混合ガス保管タンクから冷媒である ^3He ガスを数回に分けて低温部に充填しつつ、流量を可能な限り大きくするようにしている。この際の 1K pot への熱負荷は 5 mW 以下となっており、1K-JT 冷凍機の冷凍能力 10 mW at 1.7 K の範囲内となっている。上記の操作により、低温部は約 3 時間で 1K pot 温度と同程度の 2 K 以下を達成している (図 14)。2 K 以下になった後は、FP 駆動のために混合ガス量を再度調整した後、FP に熱負荷を与え駆動させて、希釈冷凍機の駆動を行っている (図 15)。FP が安定的に駆動し始め、希釈冷凍機が駆動した後は、混合ガスのさらなる濃度調整を行なって最適な状態を作り出し、低温端の到達温度が低くなるようにしている (図 16)。結果として、Test 3 でも約 12 時間で 70 mK の到達が確認された。

表 6 にシステム評価試験結果を示す。全体として、目標としていた、1K pot 温度が 1.34 K での希釈冷凍機の駆動のみならず、希釈冷凍機低温部の単体試験でも実施していなかった予冷温度 1.71 K においても、軌道上環境での常温からの冷却を模擬した 18 K からの冷却にて、希釈冷凍機が駆動して約 70 mK に到達できる事を確認し、当初予想していた以上の成果を得る事ができた。

混合室に熱負荷を与えることで冷凍能力が測定された。Parasitic な熱侵入量は $3.3 \mu\text{W}$ の見積もられ、これは Kevlar 支持構造から予測される侵入熱量とほぼ一致した。また、100 mK に

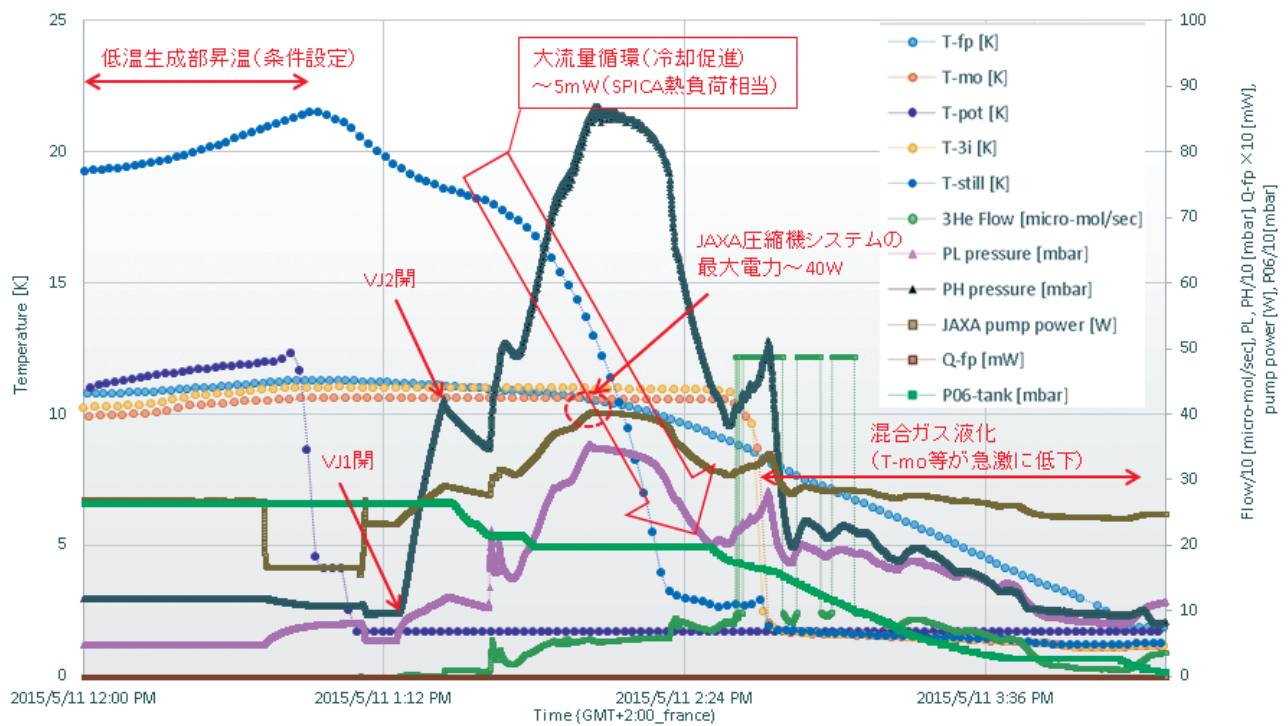


Figure 14: Test 3 のシステム評価試験結果 (18 K から 2 K 未満へ冷却)。

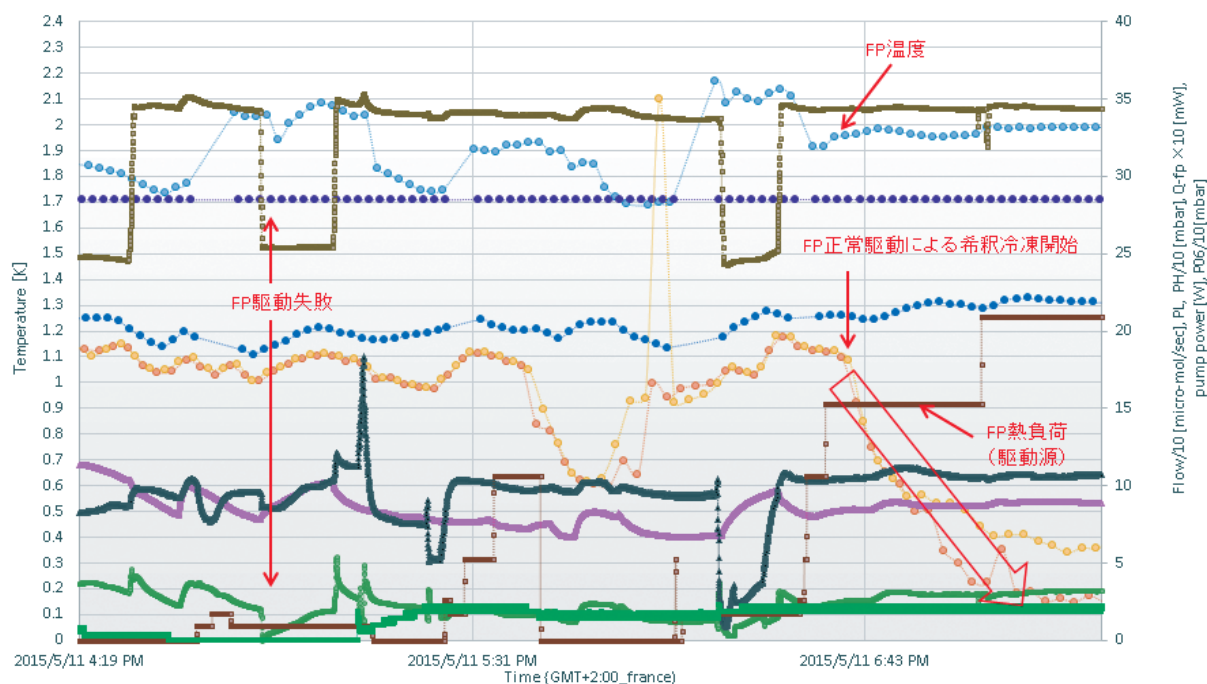


Figure 15: Test 3 のシステム評価試験結果 (1 K から 0.3 K へ冷却)。

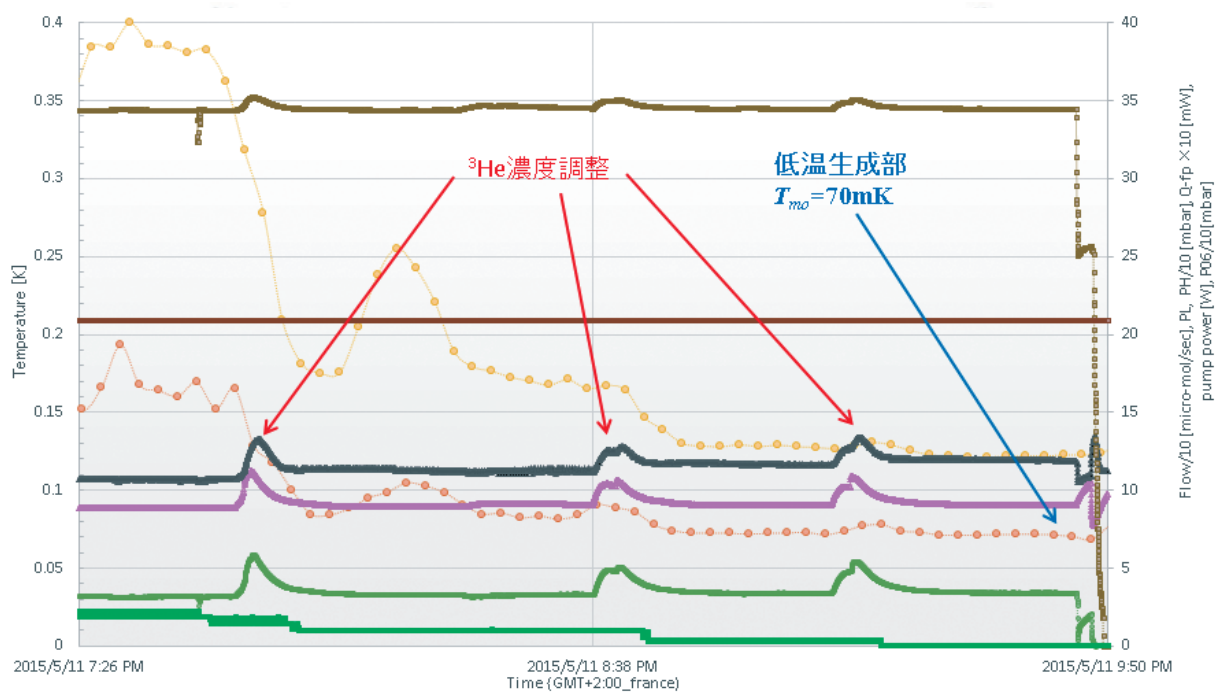


Figure 16: Test 3 のシステム評価試験結果 (0.3 K から 70 mK へ冷却)。

おける冷凍能力は、 ^4He 流量が $236 \mu\text{mol/sec}$ の状態で $3.5 \mu\text{W}$ と導出され、こちらも理論的に予想される値とほぼ一致する結果となった。

T_{pot}	1.34 K	1.71 K
Test 1 Switch pumps	Succeeded (in 2,6, and 9th May)	Succeeded (in 12th and 13th May)
Test 2 Start from 1.0 K	Succeeded (in 9th May)	Skipped (covered by at 1.71 K)
Test 3 Start from 18 K	Skipped (covered by at 1.71 K)	Succeeded (in 11th May)
Extra measurement $Q_{\text{fp}}, Q_{\text{mo}}$	Skipped (covered by at 1.71 K)	Measured (in 12th and 13th May)

Table 6: システム評価試験結果のまとめ。

6 まとめ

宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実現に向け、重要構成要素であるヘリウム3循環圧縮機システムの開発を行い、圧縮機の性能に対する駆動周波数、充填圧力、充填ガス (^3He , ^4He) の影響が確認できた。また、圧縮機内部の圧力損失等により、当初目標としていた吸込圧力を達成出来なかったものの、フランス担当の低温部の駆動に必要な流量および圧力を得ることができた。上記の成果をもとに実施した、フランスが研究開発中の低温部と結合してのシステム評価試験では、1K pot 温度が 1.71 K (1K-JT 冷凍機生成温度) の状態で、低温部が 18 K の状態から冷却を行い、希釈冷凍を駆動させ、最低到達温度 70 mK を達成し、世界初のクローズドサイクル希釈冷凍機システムの地上技術実証に成功した。

A システム評価試験ログ

1. 2nd May 2015
 - (a) First trial of the test 1 at T_{pot} of 1.34 K (succeeded).
 - (b) First trial of the test 2 at T_{pot} of 1.34 K (not succeeded).
2. 6th May 2015
 - (a) Second trial of the test 1 at T_{pot} of 1.34 K (succeeded).
 - (b) Second trial of the test 2 at T_{pot} of 1.34 K (not succeeded).
3. 9th May 2015
 - (a) Third trial of the test 1 at T_{pot} of 1.34 K (succeeded).
 - (b) Third trial of the test 2 at T_{pot} of 1.34 K (succeeded).
4. 10th May 2015
 - (a) First trial of the test 3 at T_{pot} of 1.33 K (not succeeded).
5. 11th May 2015
 - (a) Second trial of the test 3 at T_{pot} of 1.71 K (succeeded).
 - (b) The optimization trial of $^3\text{He} / ^3\text{He}$ ratio at 70 mK.
6. 12th May 2015
 - (a) Fourth trial of the test 1 at T_{pot} of 1.71 K (succeeded).
 - (b) The cooling power measurement using Q_{mo} at T_{pot} of 1.71 K.
 - (c) The inlet pressure measurement at T_{pot} of 1.9 K.
7. 13th May 2015
 - (a) Fifth trial of the test 1 at T_{pot} of 1.71 K (succeeded).
 - (b) The Q_{fp} measurement at T_{pot} of 1.71 K.

B 発表資料

**”Development of helium-3 compressors and integration test of
closed-cycle dilution refrigerator system”,
30th International Symposium on Space Technology and Science,
Kobe, Japan (2015)**



Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system

K.Shinozaki¹⁾, K.Sawada¹⁾, Y.Sato¹⁾, H.Sugita¹⁾, K.Mitsuda²⁾,
T.Nakagawa²⁾, S.Tsunematsu³⁾, K.Narasaki³⁾, G.Vermeulen⁴⁾, P.Camus⁴⁾,
S.Triqueneaux⁴⁾, S.Martin⁵⁾, S.d'eEscrivan⁶⁾

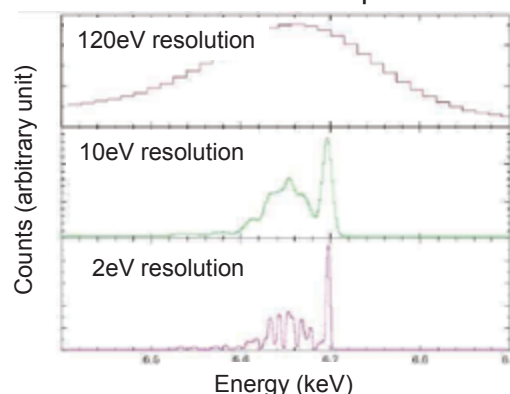
- 1) JAXA/ARD, Japan
- 2) JAXA/ISAS, Japan
- 3) SHI Ltd., Niihama works, Japan
- 4) Institute Neel, CNRS/UJF, France
- 5) Air Liquide Inc., France
- 6) CNES, France

1

International Symposium on Space Technology and Science, 10th July 2015, Kobe, Japan

1. Introduction

- ◆ **50mK low temperature** is needed to reduce a thermal fluctuation noise and realize a superior sensitivity instrument, which revolutionizes our understanding of space science and carries a new horizon in space.
- ◆ Several field's space science missions propose to use low temperature instruments.
 - X-ray astronomy: Astro-H (to be launched), Athena, DIOS
 - Infrared astronomy: SPICA
 - CMB observation: Planck (launched on 2009), LiteBIRD
- ◆ There are two methods to make below 100mK:
 - Adiabatic Demagnetization Refrigerator (ADR): High thermal efficiency, recycling time (no observational time) is needed, high magnetic field.
 - **Dilution refrigerator**: continuous cooling, no magnetic field, low technical level.
- ◆ Cooling chain from 300K to 50mK is also important.



2

2. Introduction – Planck mission

◆ Cosmic Microwave Background observation

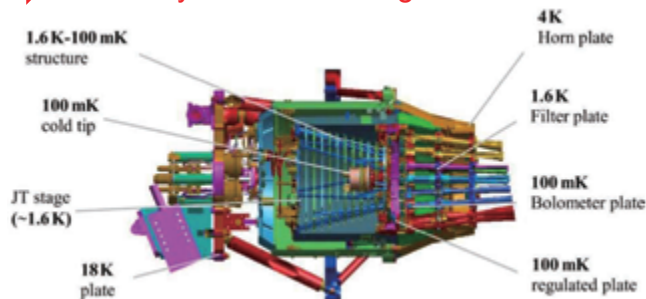
◆ Launched by Ariane V on May 2009

- 2nd Lagrangian orbit
- 40K cooled telescope (1.5m, 30~900GHz)
- 2 scientific instruments: LFI (20K), HFI (0.1K)

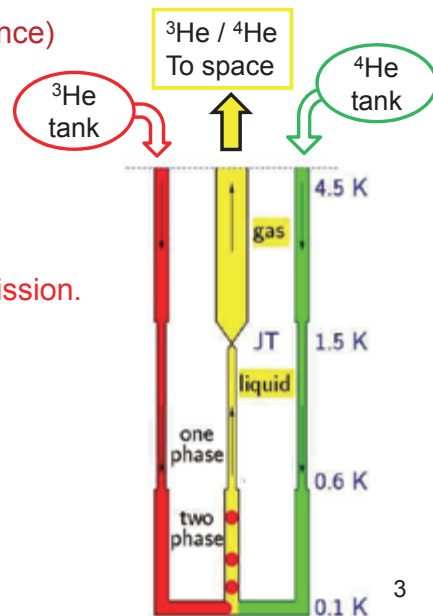
◆ The open cycle dilution refrigerator (OCDR) – (France)

- 1st dilution refrigerator in space.
- Space pump working gas (helium).
- ³He as well as ⁴He were extracted.
- Cooling power of only 100nW at 100mK.
- 12000 L of ³He and 36000 L of ⁴He.
- 2 year's operation.

⇒ Closed cycle dilution refrigerator for future mission.



S.Triqueneaux et al. Cryogenics v46 (2006)



3

2. Objective of the development

1. To develop the low pressure helium-3 compressors system test model.
2. To demonstrate the CCDDR cooling performance.

◆ Closed cycle dilution refrigerator (CCDDR) is desired for next generation space science mission.

- Higher cooling power.
- Operational temperature (<100mK) continuously.
- No magnetic field.
- Lower mass and more compactness than other cooling methods.

◆ Target: Athena, LiteBIRD, DIOS, etc..

- Cooling power: 1μW at 50mK
- Lifetime: 5 years (requirement)

◆ The helium-3 compressor is needed to circulate the helium-3 gas. The space qualified low pressure compressor had been successfully developed for 1K-class Joule Thomson cooler in Japan. Therefore, the helium-3 compressor system for CCDDR has been developed in Japan, as a new challenge of a R & D collaboration between France and Japan in the space development.

◆ Then, we tried to have the coupled test between the helium-3 compressor system and the cold part developed by France (CNES/CNRS/Air Liquide).

4

3. CCDR system

◆ What is a dilution refrigerator ?

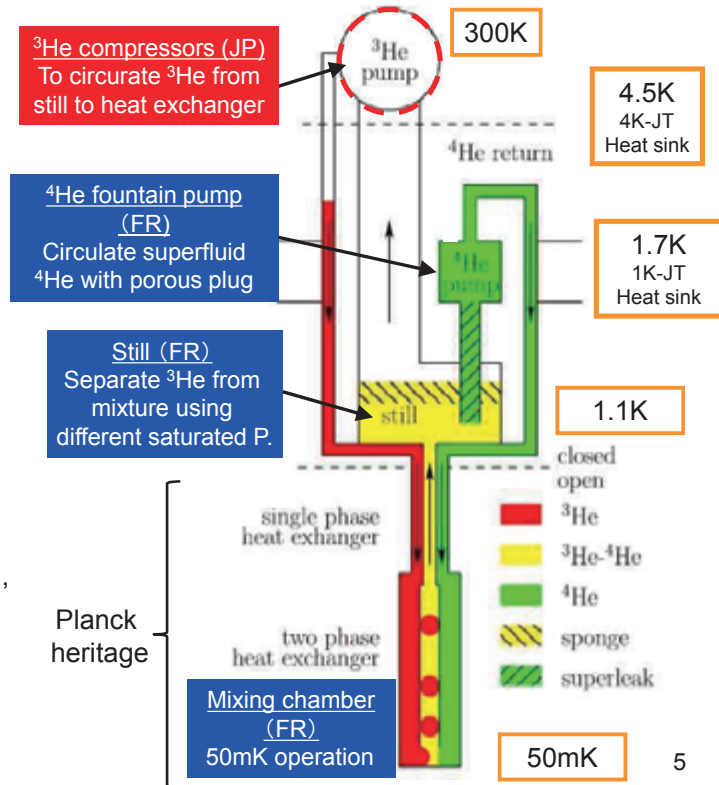
- There are two separated phases at low temperature mixing chamber in principle. ^3He rich phase (c-phase) and $^3\text{He} / ^4\text{He}$ mixture (d-phase).
- Cooling reaction is provided by a transfer of ^3He from c-phase to d-phase.
- The capillary force is used to separate two phases under microgravity (Planck heritage), while a gravitational force is used in ground.

◆ A ^3He compressors as well as a still and a ^4He pump have to be developed.

◆ Because of each technological level, international collaboration is one of best choice.

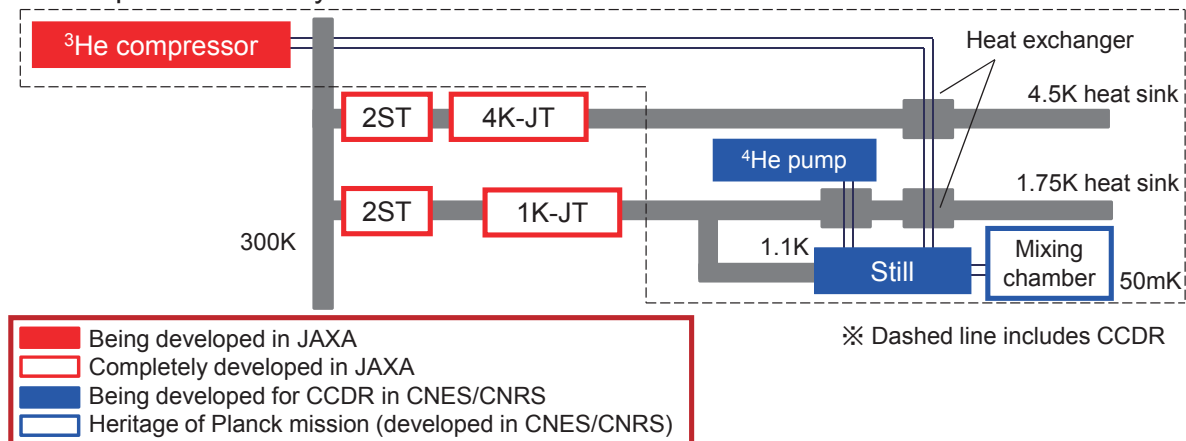
◆ Pre-cooler is needed. The use of 1K-class / 4K-class JT cooler developed by Japan are proposed.

◆ CCDR schematic drawing



4. Cryo-cooler system including CCDR

◆ Proposed cooler system



- Development should be proceeded by considering all over cryo-cooler system on an equal relationship between JAXA and CNES / CNRS.
- Pre-coolers are 4K-JT and 1K-JT cooler as a prior condition of cryo-cooler system in the CCDR study.
- Division of study
 - JAXA : ^3He compressor, 4K-JT and 1K-JT cooler
 - CNES / CNRS : ^4He pump, Still, Mixing chamber, $^4\text{He} / ^3\text{He}$ circuit
 - System evaluation test by combining each component will be performed.

5. Target of the ^3He compressors performance

◆ Targeted performance and function are as follows

Size	20cm ϕ diameter \times 50cm length per compressor	Prior condition
Mass	Lower than 25kg	Prior condition
Operating Temp	273 ~ 303 K	Prior condition, equal to 1K-JT/4K-JT
Driving freq.	10 ~ 70Hz	Prior condition
Input power	< 80W (AC) in total	Prior condition
Operating life time	> 0.5 year (5 year in future development)	Constraint condition, for the test model
Inlet Pressure	< 0.8kPa (<0.4kPa as a goal)	Constraint condition
Outlet pressure	> 20kPa	Constraint condition
Mass flow rate	> 20 $\mu\text{mol/sec}$ (>33 as a goal)	Constraint condition
Operating gas	Helium-3 (Helium-4 is used in HE3C performance measurement)	Constraint condition
Can be operated in vacuum		
Space qualified is considered		

7

6. Key parameters of the ^3He compressors development

◆ Pressure target

- The heritage of the development of 1K-class Joule Thomson cooler (1K-JT) provided a level of advantage. However, these target performances in particular low inlet pressure (0.8kPa) was challenging issues even when the heritage of 1K-JT was used.

Target	Flow rate*	Required inlet P	Required outlet P
1K-JT	2,232 $\mu\text{g/sec}$	7 kPa	700 kPa
^3He compressors	20 $\mu\text{mol/sec}$	< 0.8 kPa	> 20 kPa

◆ Compression ratio and number of compressors

- When actual performance of JT coolers are considered, typical compression ratio of each compressor is 4. Therefore, **3 compressors** are needed for the targeted ratio of over 25 in total.

◆ Contamination

- Cleanliness level has to be carefully checked for the concern of failure in compressors as well as an iceplug.

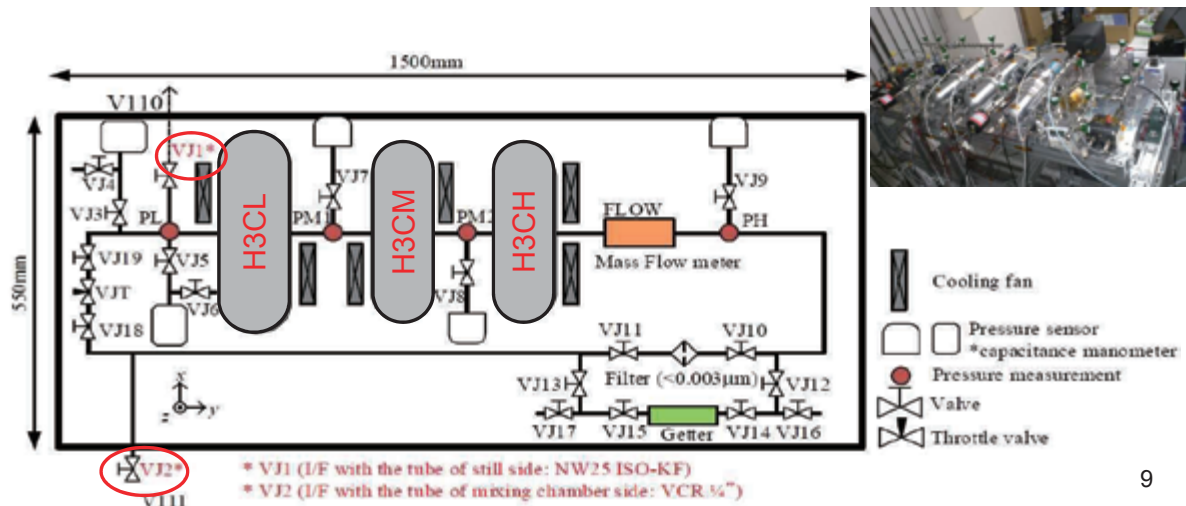
◆ Others

- Resolution of pressure and flow rate measurement.
- Operation sequence.

8

7. ^3He compressors system design

- ◆ 3 compressors in series for 3-stage compression.
- ◆ 4 pressure gauges are installed between inlet / outlet pressure of 3 compressors.
- ◆ The mass flowmeter is located to outlet to prevent the pressure loss, while the mass flow can not be measured with lower than 1kPa.
- ◆ Getter and filter are assembled in parallel for contamination issue.
- ◆ VJ1 is the I/F of inlet line, while VJ2 is used for outlet line.



9

Transportation and preparation

- ◆ Tsukuba Space Center, Tsukuba, Japan

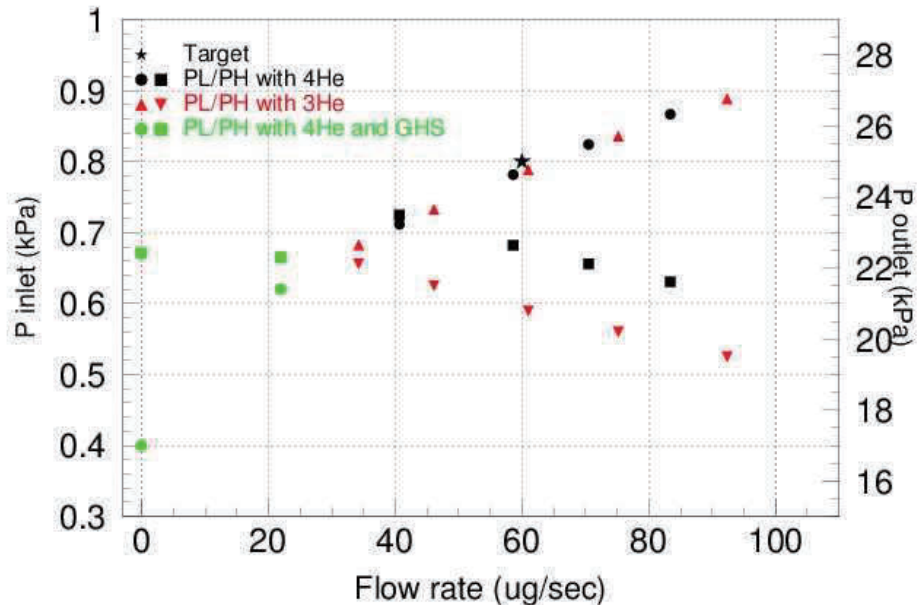


- ◆ Institute Neel, CNRS, Grenoble, France

10

8. Performance Results

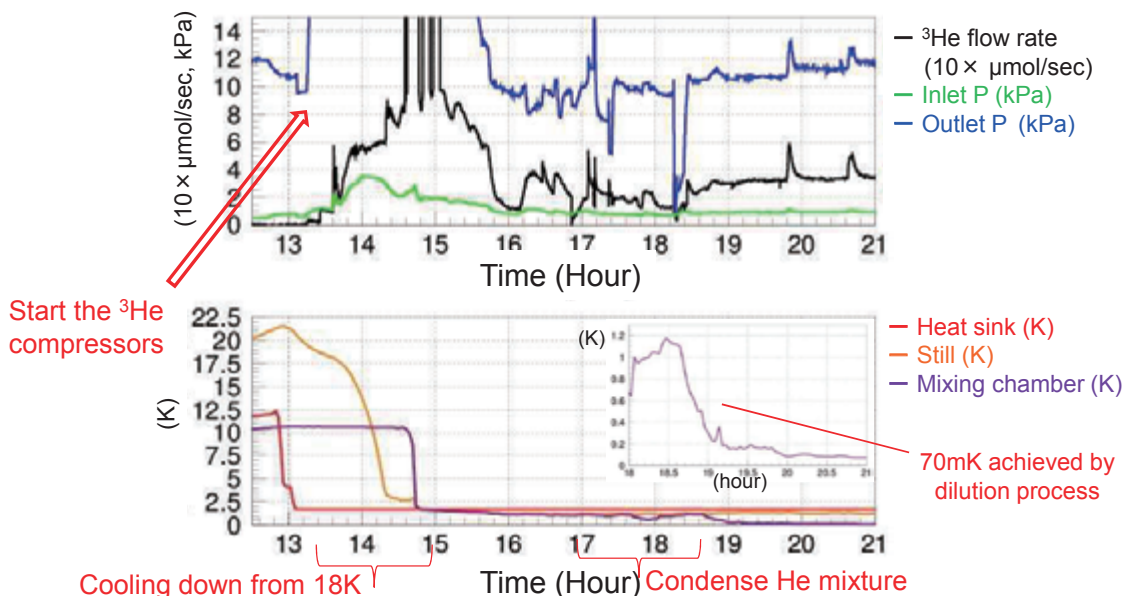
- ◆ In principle, inlet / outlet pressure are expressed as a function of the flow rate.
- ◆ Measured inlet pressures are quite similar even when charged pressure was changed from 1 to 3 kPa as well as from ^4He to ^3He , while outlet pressure is not changed. This means that a leak and pressure drop prevents the performance.
- ◆ The measured outlet pressure with ^3He is different from ^4He , which is mainly caused by different charged pressure.



11

9. Coupled test results

- ◆ Goal of the coupled test
 - To achieve lower than 100mK.
 - To demonstrate the feasibility of cooler system with CCDR, in which cooling power of $1\mu\text{W}$ at 50mK.
- ◆ Coupled test result
 - ^3He compressors has to be operated to circulate the working gas in order to cool down the mixing chamber, still and ^4He pump from higher than 10K.
 - We could obtained 70mK from 18K with the heat sink of 1.75K



12

Summary

- ◆ The ^3He compressors system has been developed until 5 years (from 2009) for a helium-3 circulator of closed cycle dilution refrigerator, as a new challenge of a R & D collaboration between France and Japan in the space development.
- ◆ We have successfully achieved the preparation for the coupled test : I/F definition, construction of measurement system with safety function, transportation, and HE3C performance measurement.
- ◆ Higher than $20\mu\text{mol}/\text{sec}$ of ^3He flow rate has been obtained at the inlet pressure of 0.8kPa in the ^3He compressors system single performance measurement. We also confirmed that the compressors system performance after transportation to Grenoble is almost consistent with the performance in Japan.
- ◆ The coupled test has been obtained 70mK from 18K by circulating the working gas with the ^3He compressors system under the heat sink temperature of 1.75K .
- ◆ We hope the great success of the coupled test would bring an opportunity to realize the refrigerator in space in the near future.



Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system

By Keisuke SHINOZAKI¹⁾, Kenichiro SAWADA¹⁾, Yoichi SATO¹⁾, Hiroyuki SUGITA¹⁾, Kazuhisa MITSUDA²⁾, Takao NAKAGAWA²⁾, Shoji TSUNEMATSU³⁾, Katsuhiro NARASAKI³⁾, Gérard VERMEULEN⁴⁾, Philippe CAMUS⁴⁾, Sébastien TRIQUENEAUX⁴⁾, Sylvain MARTIN⁵⁾ and Stéphane D'ESCRIVAN⁶⁾

¹⁾Research Unit II, Research and Development Directorate, JAXA, Tsukuba, Japan

²⁾The Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, Sagami-hara, Japan

³⁾Sumitomo Heavy Industries, Ltd. Development section, Industrial Equipment Division, Niihama works, Japan

⁴⁾Institute Neel, CNRS/UJF, Grenoble, France

⁵⁾AirLiquide Inc., Grenoble, France

⁶⁾CNES, Toulouse, France

The closed-cycle dilution refrigerator for space application is an on-going development to improve the performance of the open-cycle dilution refrigerator successfully used on the Planck mission. This solution has been considered in various projects in X-ray and far-infrared space instruments for astrophysics (ATHENA, SPICA) and in advanced studies for future CMB polarization surveys (LiteBIRD). It is shown that for sub-Kelvin applications, this refrigerator is fully competitive with some ADR-based solutions.

The helium-3 circulator is a key component to achieve the closed-cycle dilution refrigerator. JAXA and SHI have developed such a compressor by adapting the compressor of the space qualified 1K-class Joule-Thomson cooler. A coupled test of this compressor in combination with the dilution refrigerator developed by CNRS, Air Liquide and the CNES have been performed. In this paper, details of the target, design and circulation performance of the compressor system are shown. The result of first integration is also described.

Key Words: Dilution, Refrigerator, closed cycle, compressor, low temperature

1. Introduction

Low temperature instruments are major means for superior sensitivity in science observational missions. Recently, 100 mK or lower temperature is desired to obtain a high sensitivity and a high resolution spectroscopy (Athena, SPICA, LiteBIRD, etc.).^{1) 2) 3) 4)} A closed cycle dilution refrigerator is a key technology to cool down to be 50 mK with a higher cooling power and a longer life time in comparison with existing coolers in space. This is an advanced design based on the open cycle dilution refrigerator mounted in Planck satellite,^{5) 6)} and created a breakthrough in the space dilution refrigeration. In this design, ³He gas is needed to circulate as a closed cycle instead of rejecting into space, which provides higher flow rate without no limitation of life time determined by amount of gas in the storage tank.

As a current target, longer than 5 years of life time with cooling power of 0.5 ~ 1 μ W at 50 mK is expected. These target are consistent with requirements in current proposed missions. To achieve this, a space qualified helium-3 circulator is needed as a new important technology, and the low pressure compressor for 1K-class Joule Thomson cooler is one of primal candidate.⁷⁾ Then, a helium isotope separator in a still and a fountain pump to circulate a superfluid ⁴He at low temperature are also needed.

2. Conceptional design of the closed-cycle dilution refrigerator

Fig. 1 shows helium circulation lines of the closed cycle dilution refrigerator.^{8) 9) 10)} The key idea of the closed cycle dilution process is to inject and mix both helium isotopes through

two capillaries in a Y-junction, and recover the mixture through a third capillary. As low temperature (< 0.1 K), the dilute phase has a finite solubility of ³He of 6.6 %. If the ³He concentra-

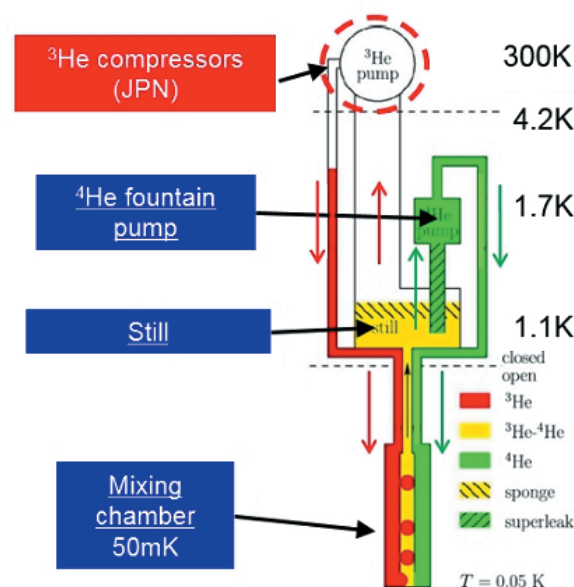


Fig. 1. The schematic drawing of the closed-cycle dilution refrigerator. The helium-3 is extracted by pumping with ³He compressors on the gaseous phase much richer in ³He (> 90 %) than the liquid phase (~10 %) and re-condensed into the still and mixing chamber. Helium-4 is extracted from the still through a superleak by means of a fountain pump.

tion exceeds this value, not all ^3He is diluted, but some stays in the ^3He -rich phase forming ^3He droplets. The cross section of the capillary is designed to be filled by these ^3He rich phase droplets where the capillary forces play the role of gravity.

The saturated liquid mixture produced in the mixing chamber enters the counter flow heat exchanger to precool the incoming ^3He before returning into the still. The ^4He is extracted from the still through a superleak by means of a fountain pump, which can only work below the superfluid transition temperature. The ^3He is extracted by pumping on the gaseous phase much richer in ^3He ($> 90\%$) than the liquid phase ($\sim 10\%$) and then re-condensed into the dilution. In zero gravity conditions, the vapor liquid phase separation must be achieved in a porous material confining the liquid phase into the still. It is possible to obtain the cooling performance of closed cycle dilution refrigerator with a still pressure in the range $0.5\sim 1.0$ kPa. This relaxes the requirements of the ^3He circulator compared to a classical dilution refrigerator.

From the technological point of view, the design of mixing chamber including Y-junction has a heritage of Planck mission.^{5) 6)} We have performed the test successfully with an upside-down version of the closed cycle dilution refrigerator including the mixing chamber, still and fountain pump. The construction and tests of the upside-down dilution refrigerator are still unpublished. Then, a helium-3 circulator is a critical component to realize the space dilution refrigerator and should be obtained a realistic performance of the cooler with it.

When a cooling chain using the closed cycle dilution refrigerator is considered for a space mission, a temperature and a cooling power needed for pre-cooling is also important. One primal candidate as a pre-cooler is a 1K-JT, which provides the cooling power of 10 mW at 1.7 K. Therefore, 1.75 K is targeted as a heat sink of a ^3He circulation line and a fountain pump, and the rejected heat into the pre-cooler, mainly generated by a fountain pump must be lower than 10 mW.

3. The target of the helium-3 circulator performance

The most important design parameter of the circulator is the inlet pressure P_{inlet} , which determines the operation temperature of a still and also has an influence to a helium-4 circulation. As a first trial, the target P_{inlet} of 0.4 kPa was determined based on the result of the closed-cycle dilution experiment using the commercial scroll pump. A pressure drop of 0.1 kPa was assumed between an interface of the circulator and the cold part in this target. In principle, a cooling power is determined by a ^4He flow rate as a function of a temperature at a mixing chamber when ^3He flow rate is enough. Tab. 1 in Chaudhry et al 9) shows that a ^4He flow rate of $350 \mu\text{mol/sec}$ is needed to obtain a cooling power of $1 \mu\text{W}$ at 47 mK for a ^3He circulation rate of $28.8 \mu\text{mol/sec}$ at a still pressure of 10 kPa. Therefore, the target flow rate of ^3He has been $100 \mu\text{g/sec}$ ($33 \mu\text{mol/sec}$) in this study. Then, the outlet pressure of 20 kPa has been determined as a target based on the experiments of the cold part.

The compressors design was based on the compressor developed for 1 K-class Joule Thomson cooler (1K-JT).⁷⁾ Though the inlet pressure of 8 kPa for the 1K-JT is assumed to be the lowest pressure provided by space qualified compressor, it is still challenging that the inlet pressure design must be improved

to achieve 1/10 lower target inlet pressure.

In this design, 3 stage compression was determined using 3 units of compressors in series. 70 mm piston diameter was used to reach the enough flow rate for low pressure compressor (H3CL), while 40 mm and 25 mm piston diameter were used for middle and high pressure compressors respectively. New suction / discharge valves with thin spring were installed for all compressors.

Fig. 2 and 3 show the helium-3 circulator test model. Cooling fans are located close to each cylinder of compressors. The mass flow meter is installed after the outlet port of the high pressure compressor to prevent the influence of the pressure drop in it. A high resolution pressure transducer MKS 690A is used to measure the inlet pressure, while MKS 121A pressure transducers are used for three other pressure. A getter and a gas filter to reject an impurity and particle in the working gas are installed in parallel.

VJ1 and VJ2 valves are used to connect the gas handling system and dilution cold part. The performance test of the helium-3 circulator is measured independently by closing these valves and the performance with different flow rate can be measured with the throttle valve located between these interface valves.

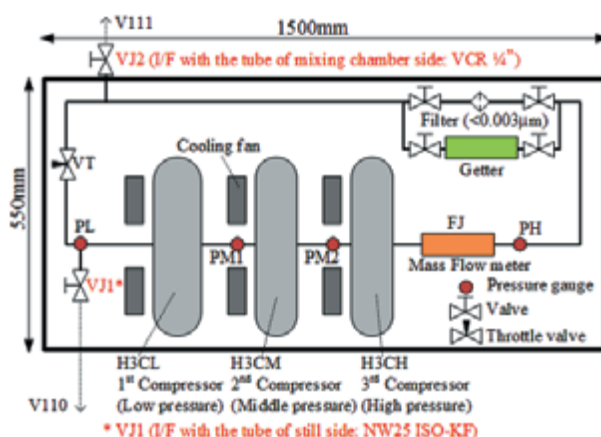


Fig. 2. The schematic drawing of the helium-3 circulator using 3 units of compressors. Mass flow meter is located close to outlet port of high pressure compressor. A getter or a particle filter can be selected in the circulation line.

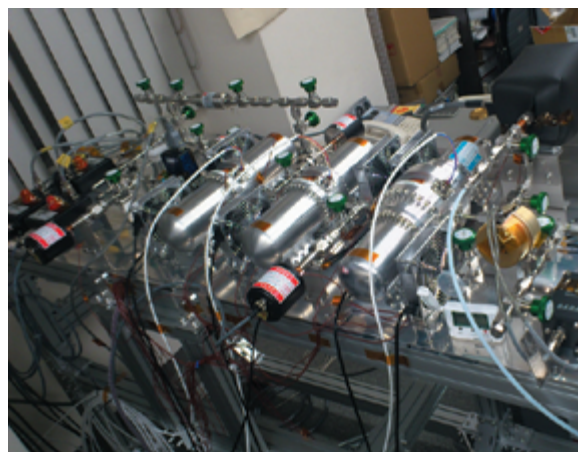


Fig. 3. The helium-3 circulator test model.

4. Performance measurements of the helium-3 circulator

Fig. 4 shows measured inlet / outlet pressure as a function of flow rate in the performance test. These driving frequencies for 3 compressors were between 22~26 Hz, which were lower than typical driving frequency for Joule Thomson coolers. The circulation performance was also checked by connecting the gas handling system. Though inlet pressure provided by the helium-3 circulator was measured with several charged pressure, the lowest inlet pressure was 0.4 kPa even when the throttle valve was closed to be no flow rate. This suggests that there is a leakage at undesirable level between the suction and discharge valves in the low pressure compressor, and the target inlet pressure cannot be achieved unless the level of leakage is reduced. Though the leak rate of around $1 \mu\text{g}/\text{sec}$ have been already measured for each valve and piston clearance respectively in low pressure compressor, these measurements were at steady flow and different behavior must be assumed with frequent dynamic gas flow in the circulator. Then, measured inlet pressure at the flow rate of $60 \mu\text{g}/\text{sec}$ was 0.79 kPa, with which the dilution process was still expected. Hence, the target value of the inlet pressure was modified to be $< 0.8 \text{ kPa}$.

In these measurements shown in Fig. 4, charged pressure were between 2.28 and 2.53 kPa. Most of all circulation performances were obtained with ^4He as a working gas, and the performance with ^3He was also measured and compared with the performance using ^4He . As shown in Fig. 4, the relation between inlet pressure and the flow rate was quite same, while measured outlet pressure was different with same driving parameters of compressors because of difference of temperature around the circulator as well as charged pressures. These indicate that the effect of different working gas from ^4He to ^3He is quite small, and the limitation of the inlet pressure provided by the circulator does not strongly depends on the charged pressure. Then, a pressure drop is the primal candidate to limit the inlet pressure, and the reduction must be needed for next improvement.

Tab. 1 shows the summary of the performance result of the

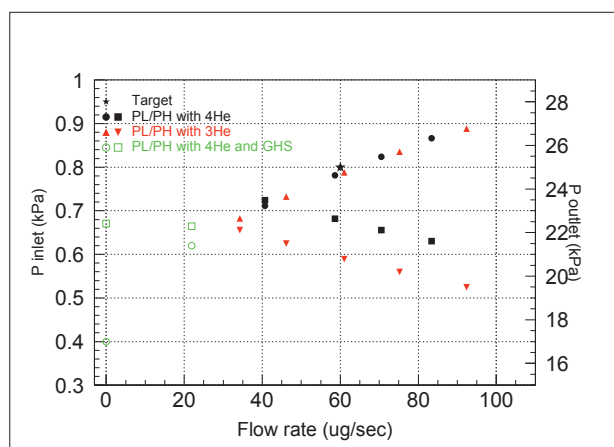


Fig. 4. Measured inlet / outlet pressure as a function of gas flow rate in the test model. The measured inlet pressure of 0.79 kPa satisfies the target value ($< 0.8 \text{ kPa}$) under the flow rate of $60 \mu\text{g}/\text{sec}$. The lowest inlet pressure with no flow rate is 0.40 kPa with the condition of outlet pressure of $> 20 \text{ kPa}$.

Table 1. The performance test result of the helium-3 circulator test model.* : the first target values before performance test.

	Target	Result
hline Flow rate	$60 \mu\text{g}/\text{sec}$ ($100 \mu\text{g}/\text{sec}$)*	$60 \mu\text{g}/\text{sec}$
P_{inlet}	0.8 kPa (0.4 kPa)*	0.79 kPa
P_{outlet}	20 kPa	21 kPa
Charged pressure	–	2.8 kPa
Total power	$< 80 \text{ W}$	35.0 W

helium-3 circulator test model. Though the initial target of inlet pressure with the required flow rate was not achieved, current performance was accepted as a helium-3 circulation pump by modifying the target for trying the closed cycle dilution refrigerator experiment. Then, total electrical power of all compressors was quite lower than 80 W, which was an upper limit defined as a prior condition.

5. Performance measurements of the closed cycle dilution refrigerator

The helium-3 circulator test model was connected to the dilution cold part through gas handling system. The gas handling system was mainly designed to switch the ^3He circulation pump from a commercial scroll pump to the helium-3 circulator test model, and manage amount of ^3He and ^4He mixture working gas in this refrigerator.

There are 3 steps for the cooling experiment, 1) switch the ^3He circulation pump to the helium-3 circulator test model and monitor these cold part temperatures when the temperature of the mixing chamber was 70 mK, 2) cool down from 1 K to lower than 100 mK with the test model, 3) cool down from 18 K to lower than 100 mK with the test model. The temperature of the heat sink was 1.35 K or 1.75 K.

As a preliminary result, 70 mK was successfully obtained in all 3 steps of cooling experiments even with the heat sink temperature of 1.75 K. It could cool down from 18 K to 70 mK in less than 12 hours by injecting the mixture gas into the cold part with respect to each temperature phase. The design of the test model of the cold part in particular mixing chamber was conservative and the lowest temperature using the commercial scroll pump was also 70 mK. Hence, these results indicate no significant defect with the helium-3 circulator to make below 100 mK.

6. Conclusion

In this study, following results have been obtained.

- The helium-3 circulator test model was designed, fabricated and measured for the closed cycle dilution refrigerator.
- Measured inlet pressure provided by the helium-3 circulator was lower than 0.8 kPa with $100 \mu\text{g}/\text{sec}$, with which the dilution refrigerator process was expected, and the compression performance with ^3He as a working gas was almost consistent with the performance using ^4He .
- As a preliminary, the cooling measurement successfully achieved to cool down from 18 K to 70 mK by connecting the helium-3 circulator test model to the dilution cold

part through the gas handling system with no significant defect with the circulator.

The closed cycle dilution refrigerator improves significantly several limitations of the Planck open cycle dilution refrigerator in view of future space missions with higher cooling power and longer lifetime. On the basis of the study and the experimental results, next target of the performance of the helium-3 circulator will be determined by taken into account a required life time.

The experimental success is a small step in the world, but it is a great step for the world of space cryogenics. We believe that these types of dilution refrigerator will be a major means near future for making 50 mK in space.

References

- 1) Ravera L, Barret D, den Herder JW, Piro L, et al. The X-ray Integral Field Unit (X-IFU) for Athena. In: Proc. SPIE, 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. vol. 91442L; 2014. .
- 2) Nakagawa T, Matsuhara H, Kawakatsu Y, Roelfsema PR. The next-generation infrared astronomy mission SPICA under the new framework. In: Proc. SPIE, 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014 Optical, infrared, and Millimeter Wave. vol. 9143-48; 2014. .
- 3) Hazumi M, et al. LiteBIRD: a small satellite for the study of B-mode polarization and inflation from cosmic background radiation detection. In: Proc. SPIE, 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared and Millimeter Wave. vol. 91431F; 2014. .
- 4) Matsumura T, et al. LiteBIRD: mission overview and design trade-offs. In: Proc. SPIE, 9143, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared and Millimeter Wave. vol. 91431F; 2014. .
- 5) Triqueneaux S, Sentis L, Camus P, Benoit A, Guyot G. Design and performance of the dilution cooler system for the Planck mission. *Cryogenics*. 2006;46:288–297.
- 6) Planck Collaboration. Planck early results. II. The thermal performance of Planck. *A & A*. 2011;536:A2.
- 7) Narasaki K, Tsunematsu S, Ootsuka K, Watanabe N, Matsumoto T, Murakami H, et al. Development of 1K-class mechanical cooler for SPICA. *Cryogenics*. 2004;44:375–381.
- 8) Camus P, Vermeulen G, Volpe A, Triqueneaux S, Benoit A, Butterworth J, et al. Status of the Closed-Cycle Dilution Refrigerator Development for Space Astrophysics. *J of Low Temperature Physics*. 2014;176:1069–1074.
- 9) Chaudhry G, Volpe A, Camus P, Triqueneaux S, Vermeulen G. A closed-cycle dilution refrigerator for space applications. *Cryogenics*. 2012;52:471–477.
- 10) Martin F, Vermeulen G, Camus P, Benoit A. A closed cycle ^3He - ^4He dilution refrigerator insensitive to gravity. *Cryogenics*. 2010;50:623–627.

C 発表資料

”宇宙用クロースドサイクル希釈冷凍機の
実現に向けたヘリウム3循環圧縮機の開発結果”,
第59回宇宙科学技術連合講演会 3M16 (2015)

第59回宇宙科学技術連合講演会

宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実現 に向けたヘリウム3循環圧縮機の開発結果

澤田健一郎, 篠崎慶亮, 佐藤洋一, 杉田寛之 (JAXA研究開発部門)

満田和久, 中川貴雄 (JAXA宇宙科学研究所)

恒松正二, 梶崎勝弘 (住友重機械工業株式会社)

Gérard Vermeulen, Philippe Camus, Sébastien Triqueneaux (CNRS*)

Sylvain Martin (Air Liquide)

Stephane d'Escrivan (CNES**)



* CNRS : フランス国立科学研究センター

** CNES : フランス国立宇宙研究センター

1

目次



研究背景

- 希釈冷凍機の原理
 - クローズドサイクル希釈冷凍機の構成
 - ヘリウム3循環圧縮機の開発結果
 - 開発目標, 開発内容, 機器構成, 単体性能確認試験結果
 - クローズドサイクル希釈冷凍機の結合実証試験
 - 試験概要, 装置構成, 試験結果概略
- (世界初)
- 重力環境に依存しない宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機で100mK以下冷却成功
- まとめと今後の課題

研究背景



天文観測ミッション高感度観測の実現

優れた感度や優れたエネルギー分解能を達成するためには、
検出器を**極低温（100mK以下）に冷却する必要がある**

X線天文観測：ASTRO-H（2016年）、Athena+、DIOS
赤外線天文観測：SPICA
宇宙背景放射観測：Planck（2009）、LiteBIRD

100mK以下の極低温生成方法は2種類

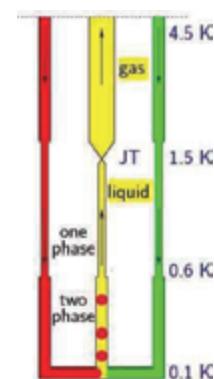
■断熱消磁冷凍機「ADR：Adiabatic Demagnetization Refrigerator」

- シンプルで高信頼性、高い熱効率、実績多
- × 強磁場・磁場変化あり、低い冷凍能力、非冷却時間あり（非連続運転）
- 現在の主要な50mK級冷凍技術
 - リサイクル時間が短く、定常冷却が可能な連続型ADRを開発中（NASA）

■ ^3He - ^4He 希釈冷凍機「DR：Dilution Refrigerator」

- 磁場が必要ない、連続運転可能、高い冷凍能力、予冷系排熱負荷小
- × 技術的難易度、実績少（**オープンサイクル方式***）
 - * Planckでは軌道上にて100mK温度で0.1 μW の冷凍能力を2.5年間以上維持
- **He初期搭載量による冷却期間と冷却能力の制限**
- **クローズドサイクル方式を研究開発中**
 - 欧州（CNRS, Air Liquide, CNES）と日本（JAXA, SHI）が共同開発中

クローズドサイクル式の希釈冷凍機が実現すれば、実現可能な重量・電力の下で、
磁場を生成せず高い冷凍能力を実現可能。予冷系への排熱負荷も比較的小さい。



オープンサイクル方式

S. Triqueneaux et al.
Cryogenics v46 (2006)

第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

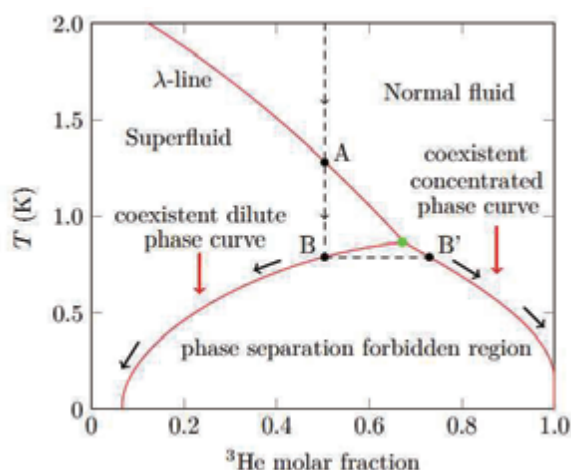
目標仕様：冷却能力1.0 μW @ 50mK, 寿命5年以上

3

^3He - ^4He 希釈冷凍機の原理



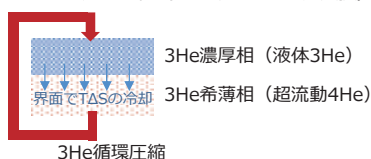
- 50%濃度のHe同位体混合液を冷却していくと、約1.3Kで ^4He が超流動状態になり、約0.8Kで ^3He 濃厚相と ^3He 希薄相に相分離され、さらに低温では ^3He 濃厚相は純 ^3He に、希薄相中の ^3He は約6.6%に近づく。
- 希薄相が絶対零度まで6.6%の ^3He 溶解量を持つ点が極低温まで高い冷凍能力が得られる希釈冷凍機の特徴
- ^3He - ^4He 希釈冷凍機では、濃厚相と希薄相が接しており、冷却生成する部分は混合器（MC: Mixing Chamber）と呼ばれ、相分離する部分は分溜器（Still）と呼ばれる。
- 分溜器温度（0.8K）では、 ^4He の蒸気圧はほぼ0で ^3He の蒸気圧は有限のため、 ^3He を選択的に蒸発可能であり、希薄相の ^3He 濃度が平衡状態より低くなる事で濃厚相から希薄相へ ^3He が溶解。この時のエントロピー差を利用することで混合液から潜熱を奪って冷却を行う。



点A：混合液の状態

点B：2相分離の状態

^3He を十分に液化（1Kポット・Still熱交換）



第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

4

クローズドサイクル希釈冷凍機の構成



^3He 循環圧縮機： ^3He pump

日本担当

- 分留器より ^3He を吸込み、低温部へ循環
- 低吸込圧かつ大流量が要求され、宇宙用で要求を満たすポンプが存在しないため、日本側が1 K-JT冷凍機用圧縮機をベースに開発を開始

^4He 循環ポンプ： ^4He pump (Fountain Pump)

欧州（仏）担当

- ^4He を分留器から低温部へ循環
- ^4He が超流動状態になる2 K以下で駆動させ、分留器と接続されたスーパーリーク間で低温側から高温側（FP本体）へと温度差分だけ超流動 ^4He が流れる熱機械効果を利用。熱負荷で流量制御

分留器：Still

- ^4He に対して ^3He の飽和蒸気圧が高い事を利用して分留
- 多孔質材の空隙の部分に毛細管力を用いて混合液を保持。 ^3He ポンプ運転量、ヒータ熱負荷で理想的な状態に制御を行う。分留器圧力は0.5~1.0 kPa、温度は1.1~1.3 K（希薄混合液中の ^3He 濃度が10%以上）で最適な駆動状態

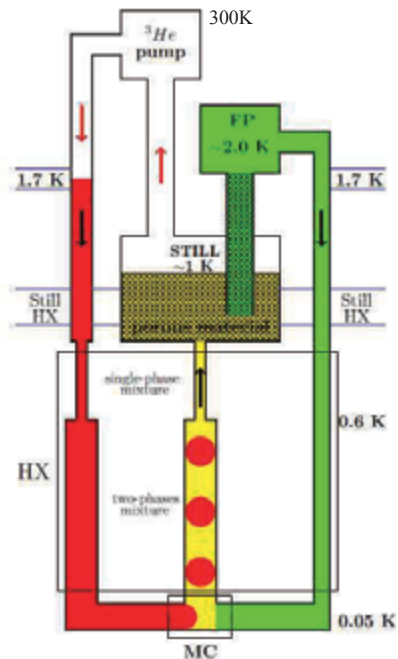
混合器：Mixing Chamber

- ^3He と ^4He が混合され、冷却発生 *オープンサイクル実証技術
- 地上のように密度差によって冷却界面を生成する事は出来ないため、ヘリウム同位体をY型分岐管に通して1つの毛細管を通過させる際に希薄相と濃厚相を分離し、その際に冷却を発生

1.7 K予冷ポット

軌道上：日本担当，地上：欧州（仏）担当

- ^4He 循環ラインと ^3He 循環ラインの予冷
- ^4He 蒸発冷却にて4.2 Kリザーバとの接続インピーダンス調整により1.3 K~1.8 K生成
- 実際の宇宙機では冷凍機にて冷却。第1候補はJAXAで開発中の1.7 K温度で10 mWの冷凍能力を生成する1 K級ジュール・トムソン冷凍機（1 K-JT冷凍機）



日本チーム（JAXA, SHI）と欧州チーム（CNRS, CNES, Air Liquide）の共同で開発開始（2011~）
 各々の開発品（BBMレベル）を結合した冷却実証試験をフランス・グルノーブルで実施（2015年5月）

3He循環圧縮機の開発（1/3）



3He循環圧縮機システムの開発結果概要

吸込圧力

- 低温生成部の地上試験結果から0.5 kPa以下であれば希釈冷凍機が駆動可能と予測
 配管部分の圧力損失等の推算結果（0.1 kPa）を考慮して仕様を決定

流量

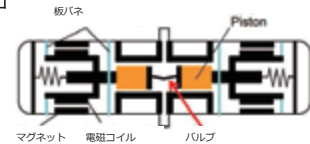
- ^4He 流量と混合器温度から冷凍能力が決定するため、50 mKで1 μW 生成可能な流量条件を設定

表 要求仕様①当初設定

	要求仕様	（参考）1 K-JT冷凍機用圧縮機
流量（ ^3He ）	$\geq 100 \mu\text{g/sec}$	2,232 $\mu\text{g/sec}$
吸込圧力	$\leq 0.4 \text{ kPa}$	7 kPa
吐出圧力	$\geq 20 \text{ kPa}$	70 kPa
駆動電力	$< 80.0 \text{ W}$	$< 75.0 \text{ W}$

■ 1 K-JT冷凍機用圧縮機をベースとして開発を実施

- 1 K-JT冷凍機用圧縮機の吸込圧力は7 kPa。宇宙用圧縮機では最低圧力。
- 低吸込圧かつ吐出圧を達成するため、**圧縮段数として3段を選定**。
- 1段目の**低圧段圧縮機**においては、目標とする吸込圧力を達成するため、従来よりも大幅に直径を増加させて圧縮体積を大きくするため、**ピストン径70 mmの圧縮機を開発**。
- 2段目（中圧段）と3段目（高圧段）については、従来のジュール・トムソン冷凍機用圧縮機で実績のある40 mmと25 mmピストン直径の圧縮機を使用。
- 圧縮機内部の改良として、圧縮に要されないデッドボリュウムの低減、圧力損失低減、更には到達圧力や過渡的な応答に影響する吸気／排気バルブの厚み最適化等を実施。

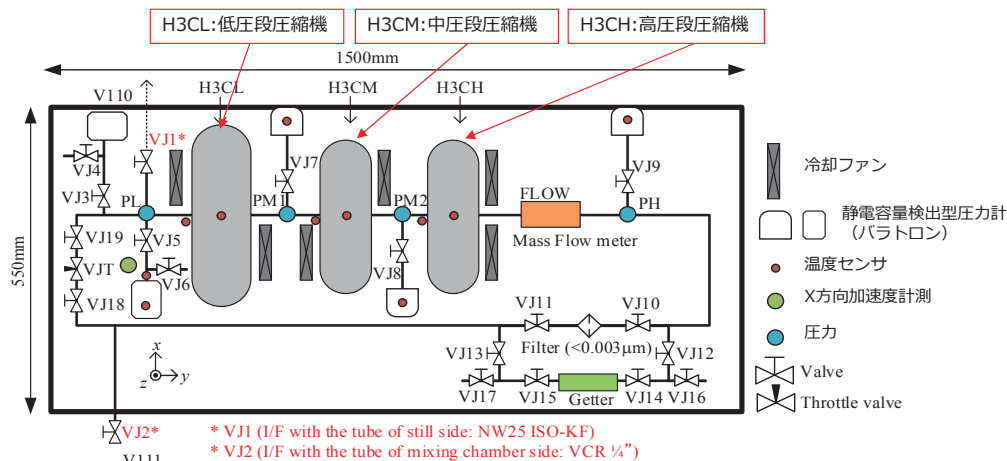




3He循環圧縮機の開発 (2/3)

3He循環圧縮機システムの構成

- ・ 圧縮機各段の前後に高精度圧力計（バロトロン/MKS）を配置して圧縮比を計測
- ・ 圧縮機の下流では質量流量計（HFM-300/Teledyne Hastings Instruments）にて循環流量を計測
- ・ 流量は流量調整バルブ（VJT）にて絞り度を調整する事で制御可能
- ・ 不純ガスの吸着用のゲッターと不純物トラップ用のフィルターをバルブ切替えにて選択
- ・ 低圧段圧縮機近傍の振動レベル計測と圧縮機と圧力計の温度を計測
- ・ 希釈冷凍機低温生成部とのI/FはVJ1とVJ2 → VJ1：分流器側配管，VJ2：混合器側配管



第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

7

3He循環圧縮機の開発 (3/3)



3He循環圧縮機システムの単体性能確認結果

3He循環圧縮機単体の性能が欧州側が要求する仕様を満足しているか確認を実施

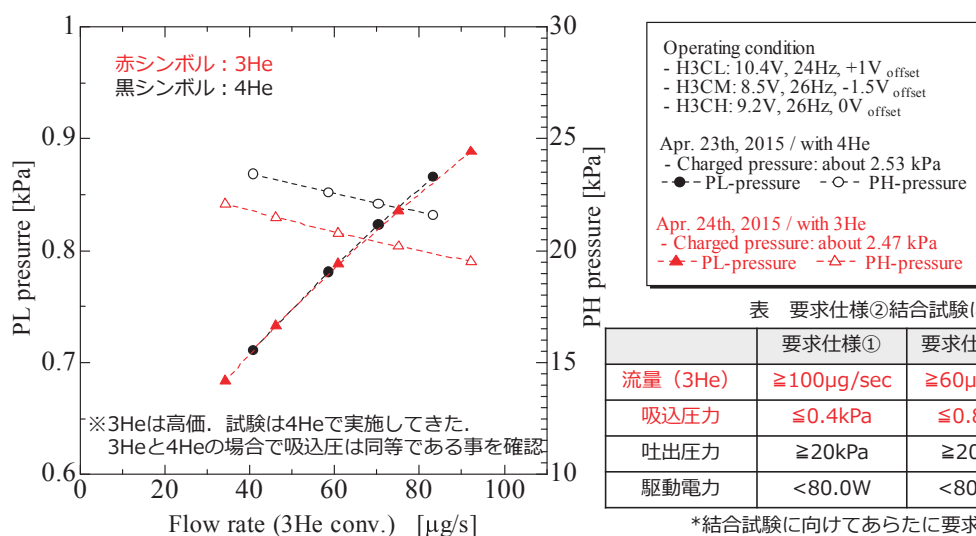


図 3He流量と吸込圧力 (PL, 左軸) および吐出圧力 (PH, 右軸) の関係

結合試験に向けて日本側の3He循環圧縮機に要求される仕様を見直し、要求仕様を満足する事を確認
欧州側低温生成部も3He循環圧縮機に地上用商用ポンプを用いて約70mKの冷却に成功済
→ 2015年5月に日本側装置一式をフランスへと輸送し、装置結合および冷却実証試験を実施

クローズドサイクル希釈冷凍機の結合実証試験 (1/3)



日本側と欧州側装置の結合および冷却実証試験の概要

結合実証試験の目標

- 予冷温度1.35K下で温度混合器温度が100mK以下に到達すること
 - ミッション要求（冷却能力1 μ W@50mK, 寿命5年）を満足する設計構成解（要求仕様）を示すこと
- * 現状で60mK以下を生成できるように設計されていないため

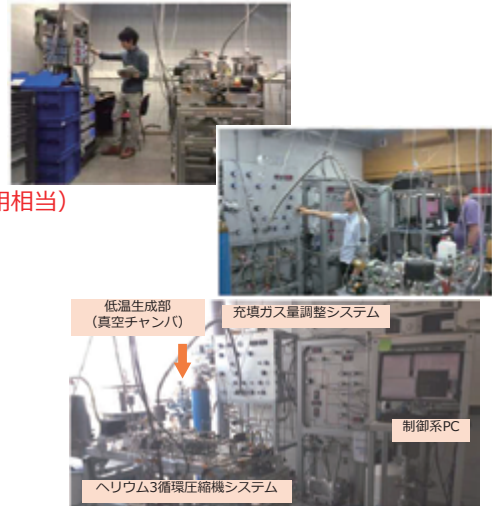


試験実施期間および試験概要

- 2015年4～5月かけて下記の冷却試験を実施
 - Test. 1: 70mK維持状態でのポンプを切り替え
 - Test. 2: 低温生成部2Kから希釈冷凍機を駆動
 - Test. 3: 低温生成部18Kから希釈冷凍機を駆動（軌道上運用相当）

表 結合試験結果まとめ

	$T_{POT} = 1.34 \text{ K}$	$T_{POT} = 1.71 \text{ K}$
Test. 1	Succeeded	Succeeded
Switch pumps	(May 2, 6, 9 th)	(May 12, 13 th)
Test. 2	Succeeded	Skipped
Start from 1K	(May 9 th)	(covered at Test 3)
Test. 3	Skipped	Succeeded
Start from 18K	(covered at 1.71K)	(May 9 th)
Extra Test	Skipped	Measured
Q_{FP} , Q_{mo}	(covered at 1.71K)	(May 12, 13 th)



予冷温度1.71K（当初目標より厳しい）下で混合器温度約70mKを達成
 → 重力環境に依存しない宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実証に成功（世界初）

第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

9

クローズドサイクル希釈冷凍機の結合実証試験 (2/3)



試験装置概略

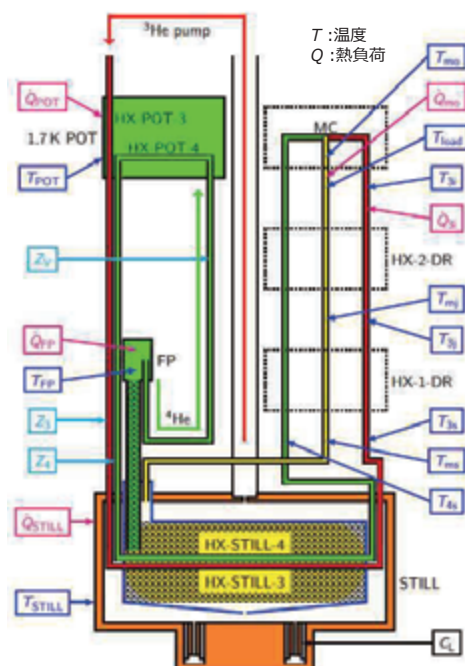
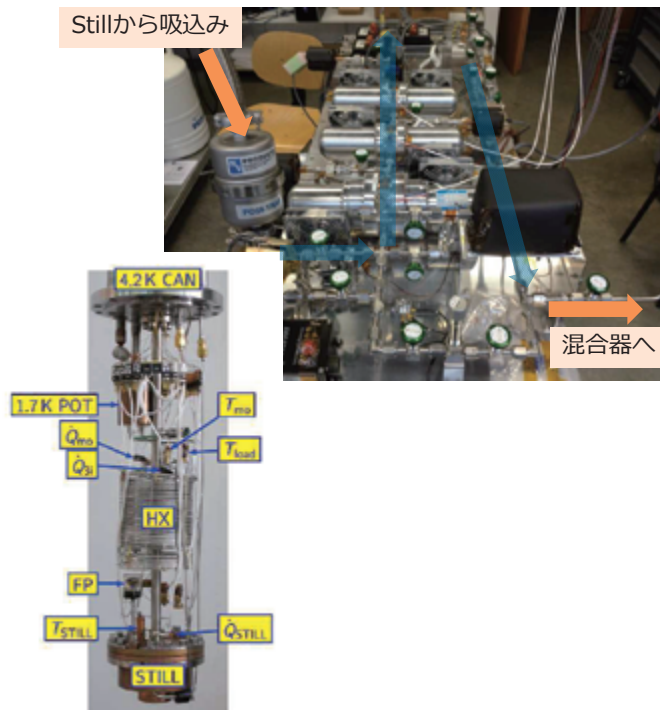


図 結合試験時の低温生成部取得データ位置

第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

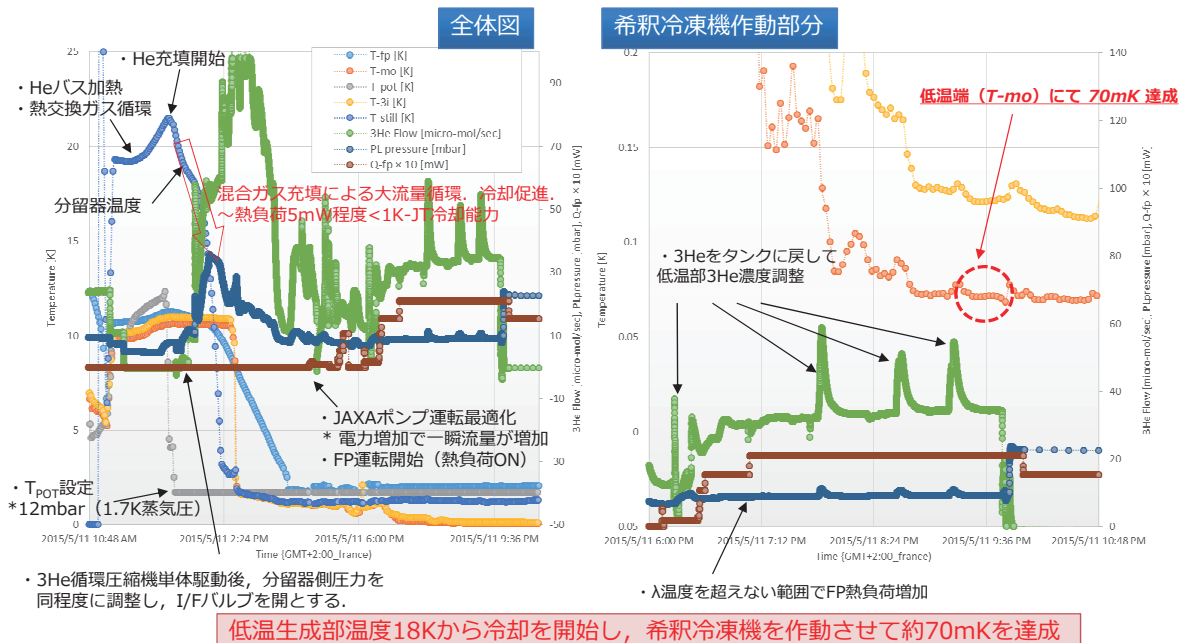


G.Vermeulen et al. CEC-ICMC, C10rD (2015) 10

クローズドサイクル希釈冷凍機の結合実証試験 (3/3)

Test. 3 $T_{\text{POT}} = 1.71\text{K}$ の試験結果

軌道上環境を想定し、低温端が18K程度の希釈冷凍機が駆動していない状態から、3He循環圧縮機にて予冷循環を行い、2K以下に全体を冷却した後、4Heポンプを駆動させ、希釈冷凍機が駆動するかどうかを確認



第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

11

まとめと今後の予定



- 宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実現に向け、重要構成要素であるヘリウム3循環圧縮機の開発を実施。欧州側低温生成部との結合試験に向け、必要な流量・圧力を達成可能な試作品を製作し、圧縮機の各種性能を確認（駆動周波数、充填圧力、充填ガスの影響）
→ 流量60.9 $\mu\text{g}/\text{sec}$, 吸入圧力0.79kPa, 吐出圧力21kPa, 電力35W
- 開発した3He循環圧縮機を欧州へ輸送し、欧州側低温生成部との結合試験では、重力環境に依存しない装置構成にて、1Kポット温度が1.71K（1K-JT冷凍機生成温度）の状態低温生成部が18Kの状態から冷却を行い、希釈冷凍機を駆動して最低到達温度70mKを達成した。
- 結合試験結果より、目標とする50mKにおいて冷凍能力1.2 μW を達成するためには、さらに大流量かつ低吸込圧力が重要であることを確認。表に示す要求仕様を目標としたヘリウム3循環圧縮機の開発を継続して開発予定。

表 3He循環圧縮機に対する要求仕様③結合試験後の設定

流量 (3He)	$\geq 150\mu\text{g}/\text{sec}$	← 難 $\geq 100\mu\text{g}/\text{sec}$
吸入圧力	$\leq 0.4\text{kPa}$	
吐出圧力	$\geq 12\text{kPa}$	← 易 $\geq 20\text{kPa}$
駆動電力	$< 40.0\text{W}$	← 易 $< 80.0\text{W}$

解析結果から目標の冷凍能力達成には以前として低い吸入圧に大して大流量が必要であることを確認



第59回宇宙科学技術連合講演会 2015年10月9日

12

D 発表資料

**”Dilution option : Development of helium-3 compressors and integration
test of closed-cycle dilution refrigerator system”,
B-mode from space, Univ. of Tokyo, Japan (2015)**



Dilution option:

Development of helium-3 compressors and integration test of closed-cycle dilution refrigerator system

K.Shinozaki¹⁾ and G.Vermeulen²⁾

1) JAXA/R&D, Japan

2) Institute Neel, CNRS/UJF, France

1

B-mode from space, 10-16th Dec 2015, University of Tokyo, Japan

1. Introduction

- ◆ There are several methods to cool down below 100mK:
 - Adiabatic Demagnetization Refrigerator (ADR): High thermal efficiency, recycling time (no observational time) is usually needed, high magnetic field.
 - Multi-stage ADR
 - Sorption cooler + ADR
 - Dilution refrigerator: continuous cooling, no magnetic field.
- ◆ Closed-Cycle Dilution Refrigerator (CCDR) is a key technology to cool down to 50mK with a comparable cooling power as an ADR but a 100% duty cycle in space.
- ◆ Recently, the coupled test between the dilution refrigerator developed by France and the helium-3 circulator developed by Japan has been performed as a breadboard test of CCDR, and successfully achieved to cool down to 70mK.
- ◆ We believe that CCDR is fully competitive with ADR-based solutions.

2

2. Introduction – Planck mission

◆ Cosmic Microwave Background observation

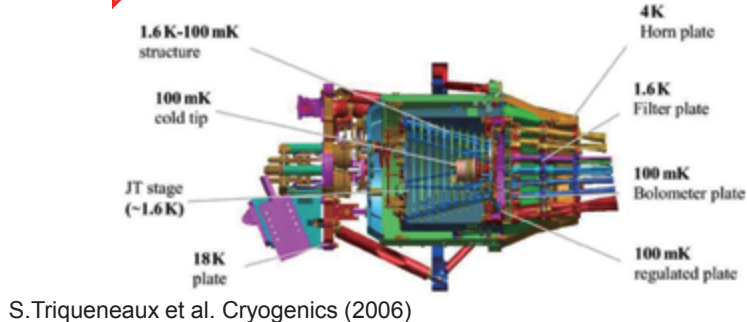
◆ Launched by Ariane V on May 2009

- 2nd Lagrangian orbit
- 40K cooled telescope (1.5m, 30~900GHz)
- 2 scientific instruments: LFI (20K), HFI (0.1K)

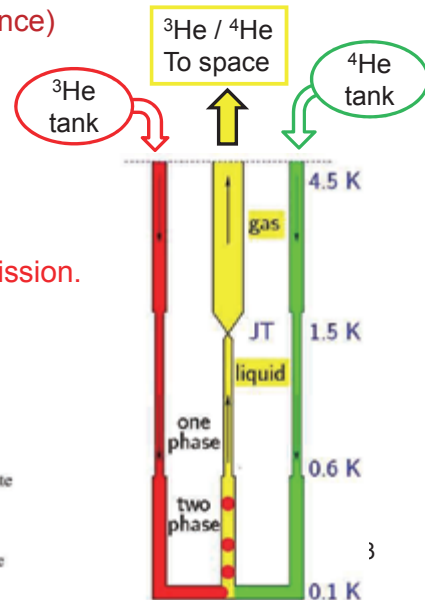
◆ The open cycle dilution refrigerator (OCDR) – (France)

- 1st dilution refrigerator in space.
- Space pump working gas (helium).
- ³He as well as ⁴He were extracted.
- Cooling power of only 100nW at 100mK.
- 12000 L of ³He and 36000 L of ⁴He.
- 2.5 year's operation.

⇒ Closed cycle dilution refrigerator for future mission.



S.Triqueneaux et al. Cryogenics (2006)



2. The CCDR development

◆ Closed cycle dilution refrigerator (CCDR) is desired for next generation space science mission.

- Operational temperature (<100mK) continuously.
- No magnetic field.
- Lower mass and easily designed to optimize the size and assembly according to the detector design.

◆ Target: Athena, LiteBIRD, etc..

- Cooling power: 1μW at 50mK, 2μW at 100mK
- Lifetime: 5 years (requirement)

◆ The helium-3 compressor is needed to circulate the helium-3 gas. The space qualified low pressure compressor had been successfully developed for 1K-class Joule Thomson cooler in Japan. Therefore, the helium-3 compressor system for CCDR has been developed in JAXA and SHI, as a new challenge of a R & D collaboration between France and Japan in the space development.

◆ A ⁴He / ³He separator in a still and a fountain pump to circulate a superfluid ⁴He at low temperature are also needed and developed by CNRS, Air Liquide and the CNES.

◆ We tried to have the coupled test between the helium-3 compressor system and the cold part.

3. CCDR system

◆ What is a dilution refrigerator ?

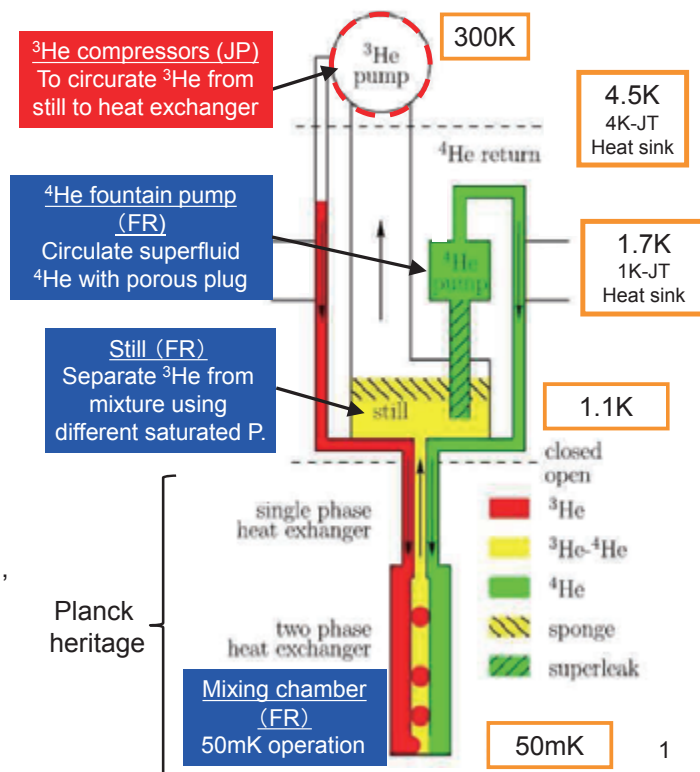
- There are two separated phases at low temperature mixing chamber in principle. ^3He rich phase (c-phase) and ^3He / ^4He mixture (d-phase).
- Cooling reaction is provided by a transfer of ^3He from c-phase to d-phase.
- The capillary force is used to separate two phases under microgravity (Planck heritage), while a gravitational force is used in ground.

◆ A ^3He compressors as well as a still and a ^4He pump have to be developed.

◆ Because of each technological level, international collaboration is one of best choice.

◆ Pre-cooler is needed. The use of 1K-class / 4K-class JT cooler developed by Japan are proposed.

◆ CCDR schematic drawing



4. ^3He compressors system design

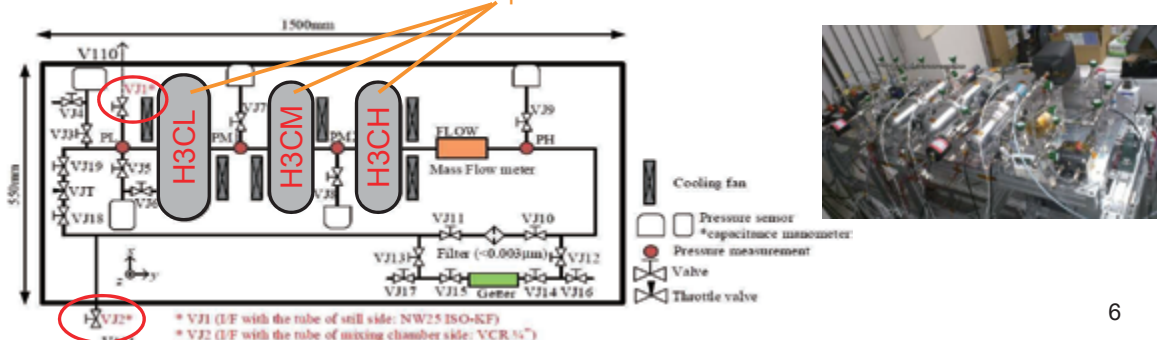
◆ Pressure target

- The heritage of the development of 1K-class Joule Thomson cooler (1K-JT) provided a level of advantage. However, these target performances in particular low inlet pressure (0.8kPa) was challenging issues even when the heritage of 1K-JT was used.

Target	Flow rate*	Required inlet P	Required outlet P
1K-JT	2,232 $\mu\text{g}/\text{sec}$	7 kPa	700 kPa
^3He compressors	20 $\mu\text{mol}/\text{sec}$	< 0.8 kPa	> 20 kPa

- ◆ When actual performance of JT coolers are considered, typical compression ratio of each compressor is 4. Therefore, 3 compressors are needed for the targeted ratio of over 25 in total.

3 compressors in series



Transportation of ^3He compressors system and preparation for the coupled test

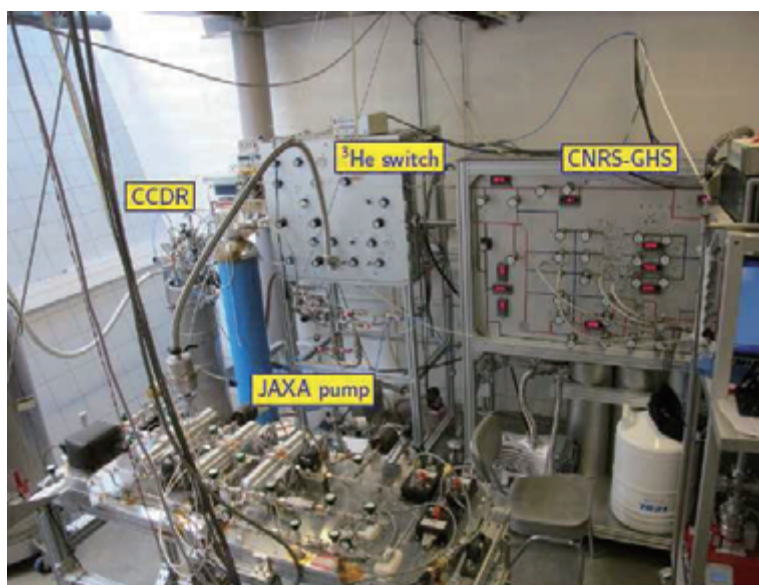
◆ Tsukuba Space Center, Tsukuba, Japan



◆ Institute Neel, CNRS, Grenoble, France

7

Experimental setup for the CCDR coupled test



8

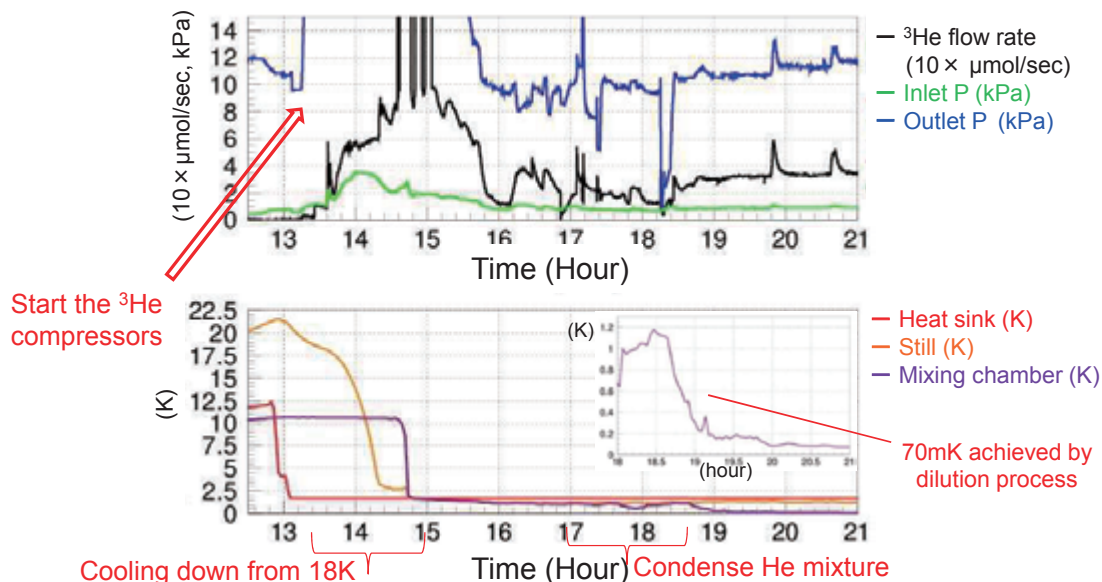
5. Coupled test results (1/2)

◆ Goal of the coupled test

- To achieve lower than 100mK.
- To demonstrate the feasibility of cooler system with CCDR.

◆ Coupled test result

- ^3He compressors has to be operated to circulate the working gas in order to cool down the mixing chamber, still and ^4He pump from higher than 10K.
- We could obtained **70mK from 18K with the heat sink of 1.71K**



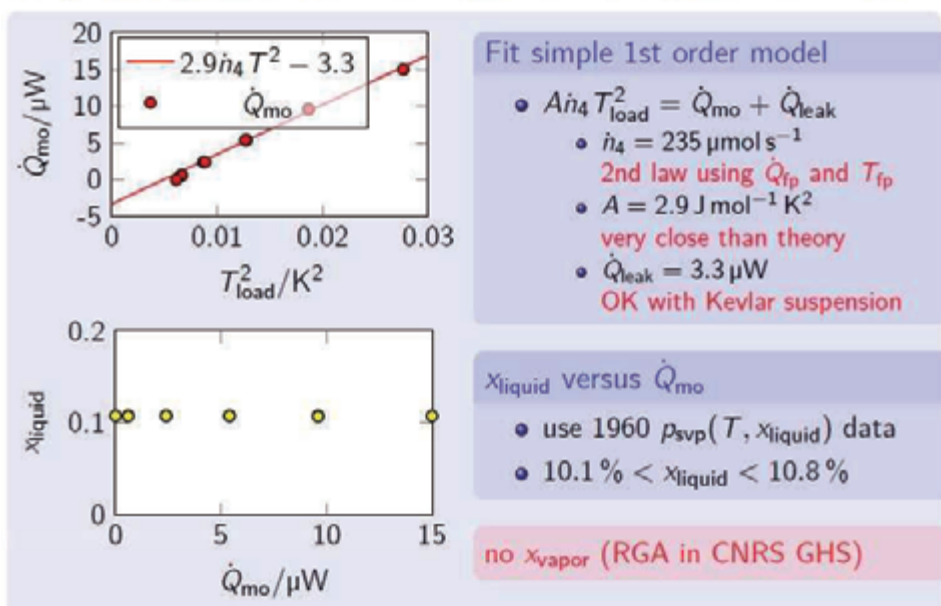
3

5. Coupled test results (2/2)

◆ Additional measurement could be obtained after the cool down test

- Step the mixing chamber heater \dot{Q}_{mo} to measure the cooling power of the CCDR.
- Step the fountain pump (fp) heater \dot{Q}_{fp} to measure the property of the fp.

Step \dot{Q}_{mo} results: $^3\text{He}-^4\text{He}$, $T_{\text{pot}}=1.71\text{ K}$, $p_{\text{still}} \approx 8.7\text{ mbar}$



3

6. Next step of CCDR development

◆ ³He compressor improvement (TRL4).

- Twice higher flow rate is targeted with lower inlet pressure (<0.4kPa).
- Current performance is assumed to be limited by a leak and a pressure drop around pistons in low pressure compressor.
- ³He reservoir tank is also designed.

◆ Optimization of cold part design (as a prototype, TRL4)

- Parasitic heat load to the mixing chamber
- Reduced flow impedance test between the still and the heat exchanger.
- Recover 1μW at 50mK in negative gravity.

◆ Next coupled test with Demonstration model

- The CCDR performance test to verify our improvement.
- Validate 50mK I/F and 300mK I/F (including thermal stability).
- Validate launch support structure thermally.
- Validate plug-in compatibility with CEA ADR (sorption cooler + ADR).
- The coupled test between the CCDR and 1K-JT / 4K-JT is also considered.

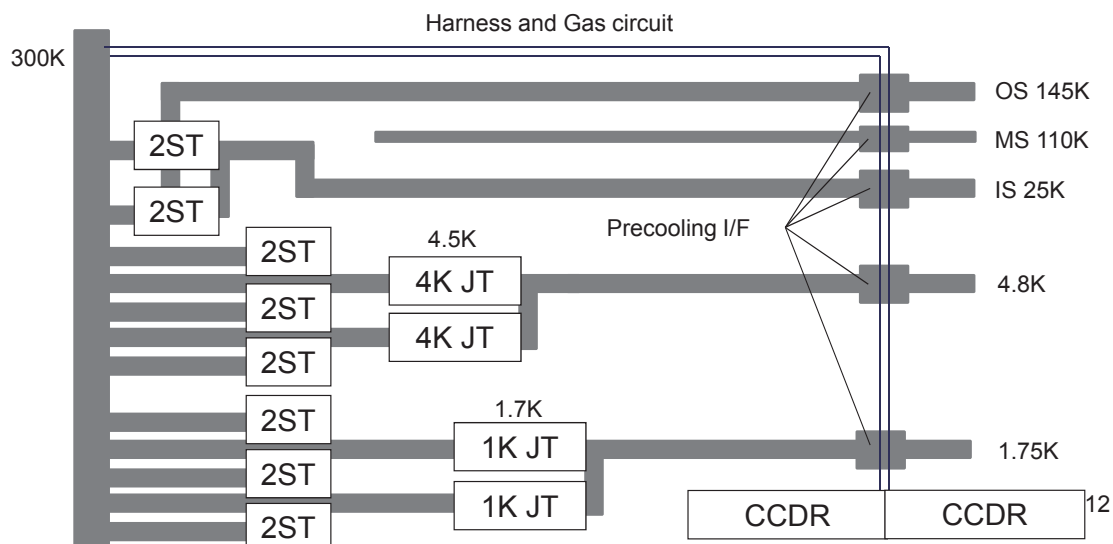
◆ Engineering model (TRL5)

- Adapted to eventual changes in X-IFU specifications.
- Pre-qualification plan and procedure for all critical components.
- Mechanical testing.

11

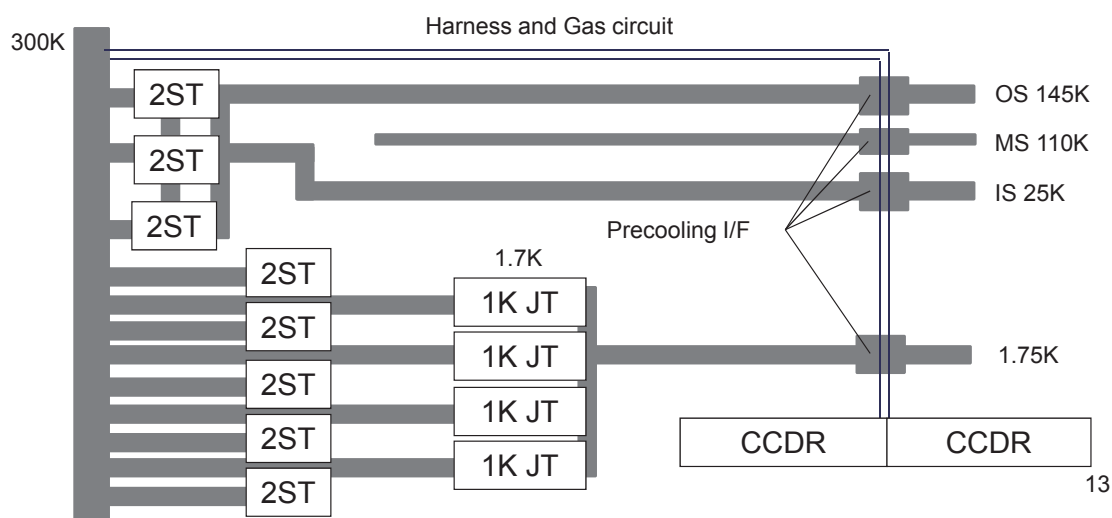
7. Cooling chain with CCDR (1/2)

- 1.75K temperature interface is needed. The heat load is about 5mW.
- (2 × 1K-JT + 3 × 2ST) + (2 × 4K-JT + 3 × 2ST) + (2 × 2ST shield cooler).
- 4K-JT cools the telescope assembly.
- For example, Nominal operation can be done even when one 1K-JT and 4K-JT are both in failure.
- Quite conservative in comparison with other cooling chains.
- More than 20 compressors, electrical power of 730W between 300K and 1.7K.



7. Cooling chain with CCDR (2/2)

- $(4 \times 1\text{K-JT} + 5 \times 2\text{ST}) + (2 \times 2\text{ST shield cooler})$.
- Easy to verify in the ground test because of few kinds of heat flows in failure modes.
- Heat load to 1K-JTs can be reduced using three 2ST shield coolers.
- More than 24 compressors, electrical power of 700W between 300K and 1.7K.



Summary

- ◆ **Closed-Cycle Dilution Refrigerator (CCDR)** is a key technology to cool down to 50mK with a comparable cooling power as an ADR but a 100% duty cycle in space.
- ◆ The coupled test between the dilution refrigerator developed by France and the helium-3 circulator developed by Japan has been performed as a breadboard test of CCDR .
- ◆ The coupled test has been obtained 70mK from 18K by circulating the working gas with the ^3He compressors system under the heat sink temperature of 1.75K.
- ◆ We believe that LiteBIRD has a good opportunity to proceed the CCDR development and to realize the refrigerator in space.

References

- [1] Martin F, Vermeulen G, Camus P, Benoit A. A closed cycle ^3He - ^4He dilution refrigerator insensitive to gravity. *Cryogenics*. 2010;50:623–627.
- [2] Sugita H, Sato Y, Nakagawa T, Yamawaki T, Murakami H, Matsuhara H, et al. Cryogenic system design of the next generation infrared space telescope. *Cryogenics*. 2010;50:566–571.
- [3] Sato Y, Sawada K, Shinozaki K, Sugita H, Nishibori T, Sato R, et al. Development status of the mechanical cryocoolers for the Soft X-ray Spectrometer on board Astro-H. *Cryogenics*. 2014 Nov;64:182–188.
- [4] Sato Y, Sawada K, Shinozaki K, Sugita H, Mitsuda K, Yamasaki YN, et al. Development of 1K-class Joule-Thomson cryocooler for next-generation astronomical mission. *Cryogenics*. 2016;74:47–54.
- [5] Serlemitsos, A T and SanSebastian, M and Kunes, E . Design of a space worthy adiabatic demagnetization refrigerator. *Cryogenics*. 1992;32:117–121.
- [6] Serlemitsos AT, et al. Adiabatic demagnetization refrigerator for space use. In: New York Plenum Press. vol. 35 of *Advances in Cryogenic Engineering*; 1989. p. 1431+.
- [7] Mitsuda K, et al. The X-ray Observatory Suzaku. Publication of the Astronomical Society of Japan. 2007 Jan;59:1–7.
- [8] Kelley RL, Mitsuda K, Christine AA, Petar A, D AM, Bialas TG, et al. The Suzaku High Resolution X-ray Spectrometer. Publication of the Astronomical Society of Japan. 2007 Jan;59:77–112.
- [9] Mitsuda K, Kelley RL, et al. Soft x-ray spectrometer (SXS): the high-resolution cryogenic spectrometer onboard ASTRO-H. In: *Proc. SPIE, 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray*. vol. 91442A; 2014. .
- [10] Shirron PJ, Kimball MO, James BL, Muench T, DiPirro MJ, Letmate RV, et al. Operating Modes and Cooling Capabilities of the 3-stage ADR Developed for the Soft-X-ray Spectrometer Instrument on Astro-H. *Cryogenics*. 2016;74:2–9.
- [11] Shirron PJ, Kimball MO, James BL, Muench T, DiPirro MJ, Bialas TG, et al. Thermodynamic Performance of the 3-stage ADR for the Astro-H Soft-X-ray Spectrometer Instrument. *Cryogenics*. 2016;74:24–30.
- [12] Shirron P, et al. A continuous Adiabatic Demagnetization Refrigerator for Cooling to 10mK and below. In: *American Institute of Physics*. vol. CP850 of *Low temperature physics*; 2006. p. 1573+.
- [13] Triqueneaux S, Sentis L, Camus P, Benoit A, Guyot G. Design and performance of the dilution cooler system for the Planck mission. *Cryogenics*. 2006;46:288–297.

- [14] Piet M, Lamarre JM, Meissonnier J, Torre JP, Camus P, Benoit A, et al. Planck-HFI thermal architecture: from requirements to solutions. In: Proc. SPIE, 4850, IR Space Telescopes and Instruments. vol. 4850; 2003. p. 740.
- [15] Sirbi A, Pouilloux B, Benoit JM Alain Lamarre. Influence of the astrophysical requirements on dilution refrigerator design. Cryogenics. 1999;39:665–669.
- [16] Benoit A, Pujol S. Dilution refrigerator for space applications with a cryocooler. Cryogenics. 1994;34:421–423.
- [17] Chaudhry G, Volpe A, Camus P, Triqueneaux S, Vermeulen G. A closed-cycle dilution refrigerator for space applications. Cryogenics. 2012;52:471–477.
- [18] Camus P, Vermeulen G, Volpe A, Triqueneaux S, Benoit A, Butterworth J, et al. Status of the Closed-Cycle Dilution Refrigerator Development for Space Astrophysics. J of Low Temperature Physics. 2014;176:1069–1074.
- [19] Duband L, Clerc L, Ercolani E, Guillemet L, Vallcorba R. Herschel flight models sorption coolers. Cryogenics. 2008;48:95–105.
- [20] Vermeulen G, Triqueneaux S, Sugita H, Sato Y, Sawada K, Narasaki K, et al. Coupled Tests of the Closed Cycle Dilution Refrigerator and ^3He Compressor for Space. Cryogenic Engineering Conference, International Cryogenic Material Conference; 2015. C10rD.
- [21] Shinozaki K, Sawada K, Sato Y, Sugita H, Mitsuda K, Nakagawa T, et al. Development of Helium-3 Compressors and Integration Test of Closed-Cycle Dilution Refrigerator System. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2016;14. To be published.
- [22] 住友重機械工業株式会社” クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機の試作評価 (その 1) 成果報告書”. XEUS-ER0006 (2011)
- [23] 住友重機械工業株式会社” クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機の試作評価 (その 2) 成果報告書”. XEUS-ER0010 (2012)
- [24] 住友重機械工業株式会社” クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機の試作評価 (その 3) 成果報告書”. XEUS-ER0015 (2013)
- [25] 住友重機械工業株式会社” クローズドサイクル希釈冷凍機用圧縮機システムの試作評価 (その 1) 成果報告書”. XEUS-ER0016 (2014)
- [26] 澤田健一郎、他宇宙用クローズドサイクル希釈冷凍機の実現に向けたヘリウム3循環圧縮機の開発結果. 第 59 回宇宙科学技術連合講演会

謝辞

本研究の実施には、住友重機械工業（株）のご協力をいただきました。

また、CNES、CNRS、Air Liquide の関係者には、機関間協力の枠組みにおけるさまざまな計画調整、低温部の研究開発およびシステム評価試験の一連の評価試験および関連作業に多大なるご協力をいただきました。厚くお礼申し上げます。

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-16-007
JAXA Research and Development Memorandum

クローズドサイクル希釈冷凍機の圧縮機開発および希釈冷凍機システム評価試験

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成29年3月21日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2017 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

