解 説

小型冷凍を用いたヘリウム液化機/再凝縮装置

吉田 茂^{*1,†}

Helium Liquefier/Recondensation Unit with Cryocoolers

Shigeru YOSHIDA^{*1,†}

Synopsis: This is a review of compact liquefaction/recondensation equipment with cryocoolers, namely, GM-coolers and pulse tube cryocoolers. The improvement of liquefaction performance is remarkable since the advent of the 4-K pulse tube cryocooler. This article describes a brief history about 4-K cryocoolers and their liquefaction performance. Additionally, commercialized helium gas liquefaction/recondensation systems with cryocoolers are introduced and those specifications are shown.

Keywords: GM cryocooler, pulse tube cryocooler, helium liquefaction/recondensation system
(Some figures in this article may appear in color only in the electronic version)

1. はじめに

2019 年には再び世界的なヘリウム危機が訪れ、日本物理学会が中心となり、「ヘリウム危機に臨んでの緊急声明」¹⁾が宣言されたことは記憶に新しいところである。今回のヘリウム危機は生産設備の故障や輸送における問題とは違って、本質的な問題である。これまで日本はヘリウムの多くを米国からの輸入に依存してきたが、米国のヘリウムガス備蓄方針の転換により、日本への輸出量がかなり制限を受けた事情に端を発している。

さて、先の緊急声明では、以下の3点が主張されている。

1. 日本では、希少で貴重な資源であるヘリウムを極力リサイクルして使用すべきである。
2. 研究機関のヘリウムユーザー、関連企業、政府は協力してヘリウムリサイクルを推進するための環境整備を行い、研究・企業活動を通してリサイクルに努めるべきである。
3. 将来のヘリウム危機に備えて備蓄施設の整備が望ましい。

これらの主張を考えると、液体ヘリウムのリサイクルにはヘリウム液化装置が必要であるし、備蓄には密度の大きい液体ヘリウムが有利となる。このため、各地の大型ヘリウム液化機を利用して、回収ヘリウムガスの再液化や備蓄

用液化ヘリウムの生産が叫ばれている。但し、大型ヘリウム液化機を利用するには、ヘリウムが使用される場所でのヘリウムガス回収設備や、液化センター（液化機設置施設）への輸送が必要となる。そこでヘリウム回収設備が無く、液化センターから離れた地域における液体ヘリウムの少量消費ユーザーには、小型冷凍機を利用したコンパクトな液化機（再凝縮器）の使用が便利といえる。

今回のヘリウム危機では、実際液体ヘリウムの小規模消費ユーザー（小口ユーザー）では液体ヘリウムが入手困難な状況にあった。彼らにはヘリウム回収設備や大型の液化機を据え付けることは非現実的であり、小型冷凍機を利用した液化機/再凝縮器は非常に有効である。小型冷凍機を用いたヘリウム液化能力は4 K パルスチューブ冷凍機の登場以来著しい進歩を遂げている。これは液化されるヘリウムガスの予冷熱交換に蓄冷管を活用した事によるが、この技術を GM 冷凍機にも応用し、4K-GM 冷凍機によるヘリウム液化効率も大きく向上した。

ここでは、4 K 小型冷凍機出現の歴史と、その後の小型冷凍機搭載型ヘリウム液化機の進歩を簡潔に振り返る。また、現在市販されている代表的な小型冷凍機搭載型ヘリウム液化機/再凝縮装置を紹介する。

2. 冷凍機の進歩

2.1 GM-JT 冷凍機

今では 4K-GM 冷凍機や 4K-パルス冷凍機が市場で容易に手に入るようになったが、これらは比較的新しい機器であり、1990 年代に入ってからのことである。それ以前では、GM 冷凍機に別途 JT（ジュール・トムソン）回路を組み合わせなければ、4 K に到達できなかった。当時はこの

Received December 6, 2020

^{*1} 九州大学

〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

[†] E-mail: yoshida.shigeru.779@m.kyushu-u.ac.jp

DOI: 10.2221/jesj.56.135

Fig. 1 GM-JT cryocooler.

GM-JT 冷凍機を用いて、ヘリウムガスの液化、又は再凝縮を行っていた。まず、代表的な GM-JT 冷凍機²⁾を Fig. 1 に示す。これは住友重機械社製の冷凍機で元々はダイキン工業社で開発されたものである。GM 冷凍機は 2 段式で、2 段目の蓄冷材には鉛の粒が使用されていた。当時冷凍能力で 3 種類のタイプがあり、その冷凍能力は 4.3 K で 1~5 W であった (Table 1)。一般的な GM-JT 冷凍機の課題としては、JT 回路の不純物による閉塞があり、連続運転の信頼性に多少の難があった。また、JT 弁での熱振動による侵入熱の予期せぬ増大に悩まされた記憶がある。一方で、初期の 4K 小型冷凍機に比べて冷凍能力の大きな機種があり、4K 冷凍能力選定の幅の大きなことが利点であった。

Fig. 1 のフロー図から解るように、3 段目ステージ (JT 回路, 4 K ステージ) は GM 冷凍機から独立しているの、3 段目ステージの配置には自由度がある。この自由度を生かして 3 段目ステージをクライオスタットの中心部まで引き込んだ例を Fig. 2 に示す³⁾。さらに Fig. 3 は、SQUID デバイス用に 4 K ステージを GM 冷凍機本体から 1 m 以上離れた例である⁴⁾。

2.2 4K-GM 冷凍機の出現

世界で初めて GM 冷凍機単体で 4 K に到達したのは、1980 年代末であった。当時、三菱電機のグループが最終段の蓄冷材に磁性材料を用いた 3 段の GM 冷凍機を製作した。この GM 冷凍機が世界で最初に文献⁵⁾に現れる 4K-GM 冷凍機であると記憶している。Table 2 に当該冷凍機のヘリウム液化能力と各段における温度を記す。3 段目の

Table 1 GM-JT cryocooler specifications.

Model Number	CG304C	CG308C	CG310C
3rd-stage capacity (W) @4.3K (50/60 Hz)	1.0/1.2	3.0/3.5	4.2/5.0
Power consumption (kW) 50/60 Hz	4.5/5.4	5.1/6.4	5.1/6.4

Fig. 2 GM-JT cryocooler for a Josephson computer experiment system.

Fig. 3 GM-JT cooler with a 1-m flexible tube.

冷凍能力は 20 mW@4.2 K であり、液化能力は僅か 10 cc/hr であった。また、Table 3 に各段に用いられた蓄冷材の種類を記す。

その後、GM 冷凍機が実用的なヘリウム液化装置として発展するのは、東芝と東工大のグループにより形状を粒径 300 μm の球形に揃えた Er_3Ni の蓄冷材⁶⁾が開発されたことによる。この蓄冷材が広く GM 冷凍機の蓄冷材として普及した理由は、磁性蓄冷材の形状 (球形) 及びその直径をコントロールできたことである。これにより磁性蓄冷材の蓄

Table 2 Operation data of the first liquefier with a GM cooler.

Liquefaction rate	Cooling power at 3rd-stage temperature (4.2 K)	1st-stage temperature	2nd-stage temperature	Compressor power
10 cc/hr	20 mW	40 K	11 K	2.5 kW

Table 3 Regenerator materials in the first liquefier with a GM cooler.

1st	Phosphor bronze (150 mesh, 220 g)
2nd	Lead shot ($\phi 0.3\text{--}0.5$ mm, 16 g)
3rd	GdErRh compound (GdRh+Gd _{0.5} Er _{0.5} Rh)

Table 4 The first helium liquefier with a two-stage GM cooler.

Liquefaction rate	Cooling power (4.2 K)	1st-stage temperature	2nd regenerator material	Compressor power consumption
50 cc/hr	0.28 W	30 K	Er ₃ Ni $\phi 0.2\text{--}\phi 0.4$	3.1-3.4 kW

冷性能と信頼性が大きく向上することとなった。更に、東芝グループはこの蓄冷材（Er₃Ni, $\phi 0.2\text{--}\phi 0.4$, 295 g）を2段目蓄冷器に充填し、世界で最初に2段GM冷凍機によるヘリウム液化に成功した⁷⁾。Table 4 にこの時のGM冷凍機の運転状況を示す。

2.3 4K-パルスチューブ冷凍機の出現

一方、GM冷凍に遅れること数年で、パルスチューブ冷凍機も4Kに到達した。最初に4Kに到達したのは日本大学の松原チームであった⁸⁾。彼らは3段のパルスチューブ冷凍機を製作し、3段目の蓄冷管に鉛とEr₃Niを充填した。この冷凍機の性能特性をTable 5に示す。彼らが4Kに到達するに当たり、彼らの第一の功績は2段パルスチューブ冷凍機の形状改良にある。この改良の過程を模式図にてFig. 4に示す。これまで、2段目のパルスチューブの温端は1段目の冷却ステージへ熱的に接続されていたが、2段目パルスチューブの温端を室温へと延長した。これにより、2段目パルスチューブのバッファオリフィスにて生じる熱を直接外気に放出できるようになり、1段目ステージの熱負荷が減少し、その結果2段目ステージの到達温度を低下させることに成功した。この技術を3段パルスチューブ冷凍機にも応用した。この改良技術は現在市販の2段パルスチューブ冷凍機の基本構造となっている。

日大グループの3段パルスチューブ冷凍機の冷凍能力は0.119 W@4.9 Kであったが、その後、Giessen大のグループ

Table 5 Operation data of the three-stage pulse tube cooler.

Cooling power at 4.9 K	1st-stage temperature	2nd-stage temperature	3rd-stage temperature
0.119 W	85 K	47 K	3.6 K
1st regenerator material	2nd regenerator material	3rd regenerator material	
Bronze mesh #250	Lead $\phi 0.3$	Lead $\phi 0.3 + \text{Er}_3\text{Ni } \phi 0.3$

Fig. 4 Progress of the pulse tube cooler.

が0.37 W@4.2 Kの2段パルスチューブ冷凍機⁹⁾を開発した。この冷凍機をベースにヘリウム液化装置を製作し、液化実験を実施した。

3. ヘリウム液化機/再凝縮器

3.1 GM冷凍機搭載従来型ヘリウム液化機とパルスチューブ冷凍機搭載改良型ヘリウム液化機

GM冷凍機がパルスチューブ冷凍機よりも先に4Kに到達したので、まずGM冷凍機を用いたヘリウム液化機（GM冷凍機付きヘリウム液化機）が開発された。典型的な液化装置の模式図をFig. 5 a)に示す。ここではこのタイプを従来型、又は隔離型と呼ぶとする。このタイプは室温のヘリウムガスを冷凍機が収納されたチャンバーに導入し、1段目ステージ（約50 K）にて予冷を行い、2段目ステージで液化をおこなう方式である。ただし、導入されたヘリウムガスは、冷却ステージのみと熱交換を行い、最終的に2段ステージで液化が行われる。これは、GM冷凍機ではシリンダー部位、特にディスプレイサー部位（蓄冷材収納部）が外部からの熱擾乱によりその温度勾配が崩れると、

Fig. 5 Helium liquefier with a GM cooler.

冷却ステージに影響し、冷却ステージ温度が下がらなくなるという懸念から冷凍機シリンダー内の温度勾配を崩さぬように冷却ステージ間のシリンダー部（ディスプレイサー部）を外部と断熱することが常であったことによる。

ところが、先の Giessen 大のグループは、開発した 0.37 W@4.2 K パルスチューブ冷凍機を用いて液化実験¹⁰⁾したところ同等冷凍能力を持つ GM 冷凍機搭載ヘリウム液化機の約 3 倍の液化能力を得た。Fig. 6 に液化実験装置の模式図を示す。このように、パルスチューブ冷凍機の 2 段階蓄冷管にスパイラルチューブを巻き付け導入ヘリウムガスとの熱交換器を形成した改良型液化機により大きな液化能力を得ることとなった。則ち、蓄冷管が有効な冷凍能力を持つ事実が判明した。そこで、パルスチューブ冷凍機搭載液化機では、この事実が判明すると積極的に蓄冷管をヘリウムガスの予冷器として利用した。Cryomech 社のグループは蓄冷管を予冷器として用いない従来型液化機に比して約 4 倍の液化能力を持つパルスチューブ冷凍機搭載ヘリウム液化機の開発に成功した¹¹⁾。用いたパルスチューブ冷凍機

Fig. 6 Pulse tube cooler helium liquefier with a second regenerator heat exchanger.

Table 6 Effects of an additional second regenerator heat exchanger for the pulse tube cooler helium liquefier.

	Improved model ^{*1}	Isolated model ^{*2}
Temperature T1	298 K	298 K
Temperature T2	37.5 K	37.5 K
Temperature T3	5.7 K	37.5 K
2nd-stage cooling power	0.635 watt	1.01 watt
Liquefaction rate at 4.2 K	14.1 L/d	3.5 L/d

Remarks: *1 with second regenerator heat exchanger,

*2 without second regenerator heat exchanger

の機種は PT410¹²⁾であり、4.2 K で 1 W の冷凍能力を持つ冷凍機である。

Table 6 に Cryomech 社の改良型液化機と従来型液化機の運転温度と液化能力等の比較を示す。ともに導入された室温のヘリウムガスは 1 段階冷却ステージで 37.5 K まで冷却されている。その後、従来型は 2 段階蓄冷管とヘリウムガスは非接触であり、2 段階の冷凍能力は 1 W を維持している。一方、改良型では導入ヘリウムガスが 2 段階蓄冷管と積極的な熱交換を行っている。その結果、2 段階冷却ステージの冷凍能力は 0.635 W に減少するが、導入ヘリウムガスは 2 段階ステージの直前で 5.7 K まで予冷されていることが判る。この結果、液化量は改良型で 14.1 リッター/日、従来型は 3.5 リッター/日という結果となった。

3.2 GM 冷凍機を用いた改良型ヘリウム液化機/再凝縮器

上述のパルスチューブ冷凍機と同様な改良を GM 冷凍機に施すことがミュンヘン工科大学で試みられた (Fig. 5 b)。

彼らは2段目シリンダーにスパイラルチューブを巻き付けることにより熱交換器を形成し、導入ヘリウムガスの予冷を行った。その結果 GM 冷凍機 (SHI 社製 RDK-415, 1.5 W@4.2 K) 1 台で、13 リッター/日の液化量を得た¹³⁾。GM 冷凍機の場合、蓄冷材は上下動する容器 (ディスプレイサー/ピストン) に詰められており、且つディスプレイサー/ピストンは冷凍機本体のシリンダー内に収納されている。このため、蓄冷管が剥き出しのパルスチューブ冷凍機と比べると、蓄冷材と導入ヘリウムガスの熱交換性能が多少劣ることは免れない。このため、当初は、GM 冷凍機の2段目シリンダーを予冷器に利用することは難しいのではないかと思われていたが、この実験により当初の危惧を見事に払しょくすることとなった。また、IUAC (Inter University Accelerator Center) のチームは冷凍機シリンダーと導入ヘリウムガスの熱交換に自然対流を積極的に活用した結果、上述の GM 冷凍機同機種 (RDK-415) を用いて、17.4 リッター/日の液化量を得ている¹⁴⁾。著者の計算によれば、RDK-415 を搭載した従来機種の液化量は 5.3 リッター/日であるので、液化機として極めて大きな進歩であるといえる。

このようにいくつかの実験により、GM 冷凍機もパルスチューブ冷凍機と比肩できる液化能力を持つことが示された。現在 GM 冷凍機とパルスチューブ冷凍機といった小型冷凍機によるヘリウム液化機の主流は蓄冷材と導入ヘリウムガスとの熱交換性能を備えたタイプとなっている。

3.3 市販のヘリウム液化機/再凝縮器

種々のメーカーが小型冷凍機を搭載した液化機/再凝縮装置を市販している。液化量は小さいもので 1 リッター/日から最大 200 リッター/日までであり、代表的なメーカーのラインナップを Table 7 に示す。この表には液化機に利用されている小型冷凍機の型式と冷凍機の消費電力 (カタログ値、一部推定値) を記載している。この一覧表は液体ヘリウム小口ユーザーによる液化機の機種選定の一助になると思う。以下に、各メーカーの機種の特長を記す。

Cryomech 社はパルスチューブ冷凍機のトップランナーであり、いち早くパルスチューブ冷凍機の持つ高効率ヘリウム液化能力に着目し、パルスチューブ冷凍機搭載のヘリウム液化機を市販したメーカーである。さらに、Cryomech 社は 4.2 K で冷凍能力 2 W のパルスチューブ冷凍機 (PT420)¹⁵⁾ を持つことが強みであり、PT420 を 3 台搭載した液化能力 80 リッター/日という液化能力最大級の小型ヘリウム液化機を製品化している¹⁶⁾。

Quantum Technology 社 (以下 QT 社) は、自社ブランドの GM 冷凍機 QCH4KDHH¹⁷⁾ を用いたヘリウム液化機を市販している。QCH4KDHH は 50 Hz 運転で 1.8 W@4.2 K, 60 Hz 運転で 2 W@4.2 K の冷凍機である。QCH4KDHH を 1 台搭載した液化機は 20 リッター/日の液化能力であるが、冷凍機を 1 台増設するごとに 20 リッター/日の液化量が増加

Table 7 Marketed helium liquefaction/recondensation units.

Maker	Model No.	Liquefaction rate (L/d)	Cryocooler model nominal cooling power @ 4.2 K	Power consumption (kW)	
				@50 Hz	@60 Hz
Cryomech	LHeP15	15	PT410 (1 W)	7.9	8.4
	LHeP22	22	PT415 (1.5 W)	9.2	10.7
	LHeP28	28	PT420 (2 W)	11.4	12.5
	LHeP55	55	PT420 (4 W) x 2	22.8	25.0
	LHeP80	80	PT420 x 3 (6 W)	34.2	37.5
Quantum technology	QL20	20	QCH4KDHH (1.8-2 W)	6.5	7.8
	QL40	40	QCH4KDHH (1.8-2 W) x 2	13.0	15.6
	QL60	60	QCH4KDHH (1.8-2 W) x 3	19.5	23.4
	QL80	80	QCH4KDHH (1.8-2 W) x 4	26.0	31.2
TNSC	TRG305PT	1	SRP062B (0.5 W)	6.5	7.5
	TRG330PT	8	SRP082B (1 W)	7.8	8.9
	TRG375DS	18	RDK415D (1.5 W x 2)	13.0	15.0
Quantum design	ATL80	12	RDK408D (1 watt)	3.8	5.4
	ATL160	22	RDK415D (1.5 W)	6.5	7.5

する製品を提供している。現在の同社のカタログには 10 台装着した液化量 200 リッター/日までの液化機が掲載されている¹⁸⁾。

ここで、ともに液化能力 80 リッター/日の Cryomech 社 LHeP80 と Quantum Technology (QT) 社 QL80 を比較してみると、搭載している冷凍機の冷凍能力はほぼ同じ (2 W@4.2 K) であるが、冷凍機の搭載台数は LHeP80 では 3 台に対して QL80 は 4 台となっている。これはパルスチューブ冷凍機の方が多少ヘリウム液化能力の高いことが理由である。一方、消費電力を見ると QL80 は 4 台の GM 冷凍機を搭載しているにも拘わらず、パルスチューブ冷凍機 3 台搭載の LHe80 より小さい。GM 冷凍機はパルスチューブ冷凍機より効率が良いことが理由である。また、一般的に冷凍機 1 台当たりの価格は GM 冷凍機の方がパルスチューブ冷凍機よりも安価である。

Courtesy of Quantum Design Japan, Inc.

Fig. 7 Helium liquefier ATL 160.

Fig. 8 Typical liquefaction system with ATL 160.

Quantum Design 社は SHI 社の GM 冷凍機を搭載した液化機 2 種類 (ATL80, ATL160) を市販している。**Fig. 7** に ATL160 を、**Fig. 8** に ATL を用いた典型的な液化システムの代表例を図示する。このシステムでは、外部からのヘリウムガスと NMR から蒸発したガスを ATL に戻し、ATL 内で再液化したのち、液体ヘリウムを NMR にトランスファーするシステムとなっている。必要に応じて、NMR 装置へトランスファーする際のフラッシュガスを回収するためのバッファータンクを設置する例もある。

次に、大陽日酸社 (TNSC) のヘリウム再凝縮装置を **Fig. 9** に示す。こちらの装置は実験用の液体ヘリウム容器に断熱管を差し込むタイプである。容器から蒸発したヘリウムガスを上方の装置本体に取り込み、再凝縮した液体ヘリウムを容器に戻し、容器からの蒸発損失を防ぐタイプである。この機種は、1 台の実験装置ごとに 1 台の再凝縮装置が対応する。搭載する小型冷凍機は GM 冷凍機とパルスチューブ冷凍機の両タイプがある。NMR 装置では振動の少ないパルスチューブ冷凍機が好まれるようであるが、GM 冷凍機でも NMR 測定に支障がないとの事である。パルスチューブ冷凍機は必ず縦置き姿勢で装着しなければならないので、

a) A photograph of a recondensation unit for NMR

b) Schematic drawings of the system

Courtesy of Taiyo Nippon Sanso Co.

Fig. 9 Helium recondensation unit for NMR.

装置全高が高くなる。このため、当装置の設置には実験室に十分な天井高さが必要になる。一方、GM 冷凍機は横置き姿勢で装着できるので、天井の低い実験室では有効である。

ここで、小型冷凍機搭載のヘリウム液化機/再凝縮器選択の一助になると考え、GM 冷凍機とパルスチューブ冷凍機の長短を簡単に述べておく。

○GM 冷凍機

- ・長年の実績と信頼性が高い
- ・比較的安価
- ・冷凍機効率が良い
- ・取付姿勢の制限が無い
- ・振動が大きい
- ・蓄冷材 (磁性材料) が往復動する
- ・磁場中での作動が不安定

- ・ヘリウム液化効率が少々劣る

○パルスチューブ冷凍機

- ・比較的高価
- ・冷凍機効率が少々劣る
- ・取付姿勢が直立のみ
- ・振動が小さい
- ・磁場による冷凍機運転への影響が小さい
- ・ヘリウム液化効率が良い

4. おわりに

今後は世界中で慢性的なヘリウム不足が懸念されており、特に液体ヘリウムの小口ユーザーにとって、液体ヘリウムの入手が困難になることは予想に難くない。このため、貴重な資源であるヘリウムは、回収・再利用しなければならないが、小型冷凍機を搭載したヘリウム液化機/再凝縮装置は、有効な実施手段の一つである。恐らく小口ユーザーには近い将来必要不可欠な機器となるであろう。

このような観点から、GM 冷凍機とパルスチューブ冷凍機を搭載したヘリウム液化機/再凝縮装置について、その進化と商品化の状況を俯瞰してきた。そこで、以下に小型冷凍機を搭載したヘリウム液化機/再凝縮装置を総括する。

- ・小型冷凍機を搭載したヘリウム液化機/再凝縮器は点在する少量液体ヘリウム消費者にとって、ヘリウム資源再利用の有効な手段である。
- ・GM 冷凍機とパルスチューブ冷凍機を搭載したヘリウム液化機の両者の性能には顕著な差は無い。どちらかの選択は利用者の状況による。
- ・1 台の小型冷凍機でもその液化能力は 20 リッター/日以上を持っている。
- ・種々のヘリウム液化機/再凝縮装置が既に世界中で市販され、稼働している。

本解説文を執筆するに当たり、貴重な資料をご提供いただいた日本カンタムデザイン株式会社坂本氏、住友重機械工業株式会社福島氏、及び大陽日酸株式会社梅野氏、山中氏に謝意を申し上げる。

参 考 文 献

- 「ヘリウム危機」に臨んでの緊急声明文，日本物理学会ホームページ，<https://www.jps.or.jp/information/docs/seimei20191220.pdf>（参照 2020-09-04）
- 住友重機械社製 4K-GM-JT 冷凍機カタログ，http://www.shicryogenics.com/wp-content/uploads/2012/11/4K_GM-JT_Outline_Drawing.pdf（参照 2020-09-04）
- S. Yoshida, T. Sano, Y. Kamioka, S. Kotani, A. Inoue, H. Suzuki and S. Hasuo: "A cryogenic system for Josephson computers," *Advances in Cryogenic Engineering* **37** (1992) 623-629
- S. Yoshida, T. Umeno and Y. Kamioka: "Development of a flexible separated 4K head refrigerator for a SQUID system," *Advances in Cryogenic Engineering* **39** (1994) 1263-1270
- M. Nagao, T. Inaguchi, H. Yoshimura, T. Yamada and M. Iwamoto: "Helium liquefaction by a Gifford-McMahon cycle cryocooler," *Advances in Cryogenic Engineering* **35** (1990) 1251-1260
- M. Sahashi, Y. Tokai, T. Kuriyama, H. Nakagome, R. Li, M. Ogawa and T. Hashimoto: "New magnetic material R_3T system with extremely large heat capacities used as heat regenerators," *Advances in Cryogenic Engineering* **35** (1990) 1175-1182
- T. Kuriyama, M. Sahashi, H. Nakagome, T. Eda, H. Seshake and T. Hashimoto: "Helium liquefaction by a two-stage Gifford-McMahon-cycle refrigerator using new regenerator material of Er_3Ni ," *Jpn. J. Appl. Phys.* **31** (1992) L1206-L1208
- Y. Matsubara and J.L. Gao: "Novel configuration of three-stage pulse tube refrigerator for temperatures below 4 K," *Cryogenics* **34** (1994) 259-262
- C. Wang, G. Thummes and C. Heiden: "A two-stage pulse tube cooler operation below 4 K," *Cryogenics* **37** (1997) 159-164
- G. Thummes, C. Wang and C. Heiden: "Small scale 4He liquefaction using a two-stage 4 K pulse tube cooler," *Cryogenics* **38** (1998) 337-342
- C. Wang: "Efficient helium recondensing using a 4K pulse tube," *Cryogenics* **45** (2006) 719-724
- Cryomech 社冷凍機カタログ，<https://www.cryomech.com/products/pt410/>（参照 2020-09-09）
- P. Schmidt-Wellenburg and O. Zimmer: "Helium liquefaction with a commercial 4 K Gifford-McMahon cryocooler," *Cryogenics* **46** (2006) 799-803
- A. Choudhury and S. Sahu: "Experimental helium liquefier with GM cryocooler," *Review of Scientific Instruments* **88** (2017) 065116
- Cryomech 社冷凍機カタログ，<https://www.cryomech.com/products/pt420/>（参照 2020-09-09）
- Cryomech 社冷凍機カタログ，<https://www.cryomech.com/products/lhep80/>（参照 2020-09-09）
- Quantum Technology 社冷凍機カタログ，<https://quantum-technology.com/documents/COLD%20HEAD%20BROCHURES/QCH4KDHH.pdf>（参照 2020-09-09）
- Quantum Technology 社冷凍機カタログ，<https://quantum-technology.com/documents/LIQUEFIER%20BROCHURE/QLHe20-40-60-80-100-200Lday.pdf>（参照 2020-09-09）

吉 田 茂

1957 年 1 月 30 日生。1980 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。2003 年九州大学大学院博士後期課程（エネルギー量子工学専攻）修了。1982 年東洋酸素（株）（現大陽日酸（株））入社。2018 年九州大学教授。主に低温機器開発に従事。低温工学・超電導学会，電気学会会員。工学博士。