

# 総説

## MRI 装置用超電導磁石 の冷却システム

### Magnet-Cooling System of Superconducting MRI

森田 武彦 (住友重機械工業㈱精密事業本部)

小泉 達雄 ( 同 上 )

#### キーワード

MRI, 超電導磁石, 液体 He, 液体 N<sub>2</sub>, クライオスタット, 輻射熱シールド板, He 冷凍機, ギフォード・マクマホンサイクル, He 再凝縮

#### 要 旨

日本における MRI 装置は 1982 年頃より導入を開始している。年々設置台数は増加しているが、超電導 MRI 装置は 1984 年東京大学に導入されたのが最初であり、1986 年度末には累計約 30 台の設置台数になると見込まれている。

MRI 診断の上から高磁界強度の静磁場の要求が強くなるにつれて超電導 MRI 装置が必要となってきている。この超電導 MRI 装置に使用される超電導磁石は、その超電導状態を保持するため液体 He 中に浸漬する必要がある。この液体 He 容器の液体 He 蒸発量を少なくするため、この容器の外側に液体 N<sub>2</sub> 容器を設け外部からの熱侵入を抑えている。これらの容器を含めた開放型クライオスタットにおいては、液体 He、液体 N<sub>2</sub> とも蒸発ガスは大気に放出している。最近、この蒸発ガスを抑える各種の冷凍機を利用した冷却システムの開発が行われており、一部、実際の装置に付属して使用されている。以下、本論では各種冷却システムの概要を述べる。

## 1 MRI 装置の超電導化傾向

MRI 装置の静磁界用として使用されている磁石には永久磁石、常電導磁石および超電導磁石がある。静磁界強度からいえば永久磁石、常電導磁石とも、現状では 0.3 テスラ (3,000 ガウス) 程度が限界である。これらに対し超電導磁石では、2 テスラの装置が製造されるようになった。さらに 4 テスラの全身用装置が開発中であるといわれる。磁石の高磁界化は  $^{31}\text{P}$ ,  $^{23}\text{Na}$ ,  $^{13}\text{C}$  など原子核の磁気モーメントの非常に小さいものを検出するのに必要なためである。

1977 年 FONAR 社社長のダマディアン博士が超電導磁石により世界初の生きた人間の MRI 撮影に成功し、1979 年に英国 Oxford Instruments 社は、最初に全身用 MRI 装置の 0.3 テスラ超電導磁石をロンドンの Hammersmith 病院とサンフランシスコの California 大学メディカルセンター向けに納入した。同社はさらに、1982 年に最初の 1.5 テスラ、内径 1 m の超電導磁石を General Electric 社に製造・納入した。高磁界の超電導磁石の安定性や信頼性における有用性は、Oxford Instruments 社の開発に負うところが大きい<sup>1)</sup>。

世界的にみて MRI 装置の磁石は超電導化されつつあり、現在まで約 600 台の超電導 MRI 装置が製造されている。米国では 400 台以上は設置されており、MRI 装置搭載の移動診断車も実用化されている。

日本においては、製造メーカー各社とも常電導 MRI 装置の厚生省認可に続き、超電導 MRI 装置の認可申請により高磁界化、超電導化の傾向が強くなっている。超電導磁石自体は英国 Oxford

Instruments 社のものを採用している会社が多いが、最近、三菱電機(株)、(株)日立製作所、(株)東芝などは、0.5~2 テスラの独自の超電導磁石を開発している。

ところで、MRI 装置の超電導磁石には、その超電導状態を安定して保つために液体 He はなくてはならないものである。He ガスは天然ガスの成分として含まれており、工業的に分離・精製される。日本における He ガスは、国内では産出されず全量米国より液体 He の状態で専用コンテナにより輸入されている。国内の各基地で He ガスポンプまたは液体 He 容器に移充填し販売されている。年々液体 He の輸入量は増加しており、1984 年 9 月から翌年 8 月の 1 年間は 3,800 m<sup>3</sup> (ガス換算 270 万 m<sup>3</sup>) となり、同年前期より 16% 増となっている。

日本における超電導 MRI 装置は今年度末には約 30 台になるとみられる。まだ液体 He の使用量としては少ないが、装置 1 台の液体 He のセットアップ量を 0.8 m<sup>3</sup>、超電導状態での定常液体 He 蒸発速度は補給充填ロスを含めて 0.4 l/時 (液) とすると、年 3.5 m<sup>3</sup> となり、年間 1 台当たり 4.3 m<sup>3</sup>、30 台では約 130 m<sup>3</sup> (ガス換算 9 万 m<sup>3</sup>) の液体を消費することになる。これは全液体 He 輸入量の 3.4% である。しかし今後、超電導 MRI 装置の設置は確実に増加すると思われる、液体 He の使用量も同様である。

液体 He の日本における価格は米国の生産量とコストによるところが大きく、一時期米国の値上げ通告により国内販売価格が一気に値上がりしたことがある。最近是对ドル円高もあり、わずかながら値下がり傾向にある。国内の地域により異なるが、通常 1 l 当たり 1,500 円前後、交通不便な地域で 3 千円程度となっている。

## 2 超電導磁石用クライオスタット

MRI 装置用超電導磁石には液体 He が必要で

受 付 1986年 9月17日  
 最終稿受付 1986年 9月20日  
 別刷請求先 (〒188) 田無市谷戸町 2-1-1  
 住友重機械工業(株)精密事業本部  
 森田 武彦

表 1 液化ガスの物性値

物 性 値	単 位	${}^4\text{He}$	p- $\text{H}_2$	$\text{N}_2$	
分 子 量	kg/kmol	4.0026	2.0159	28.013	
沸 点 (1 atm)	K	4.215	20.28	77.348	
臨 界 点	温度 圧力	K	5.22	32.98	125.98
		atm	2.27	12.76	33.49
三 重 点	温度 圧力	K	$\lambda$ 点 2.173	13.81	63.148
		Torr	$\lambda$ 点 37.89	52.8	94.6
蒸 発 潜 熱 (1 atm)	kJ/kg	20.91	446.5	199.1	
顕 熱 (300 K-沸点)	kJ/kg	1,541.8	3,509.5	233.8	
定 圧 比 熱 (273 K, 1 atm)	kJ/kg·K	5.233	14.21	1.042	
比 熱 比 ( $C_p/C_v$ ) (273 K, 1 atm)	$C_p/C_v$	1.660	1.378	1.402	
密 度	気 体 蒸 気 液 体	kg/m <sup>3</sup>	0.17847	0.08985	1.2505
		kg/m <sup>3</sup>	17.2	1.34	4.59
		kg/m <sup>3</sup>	124.8	70.838	804.2
気体 (273 K, 1 atm) と液体 (沸点) の体積比 単位液体蒸発量に相当する熱量	— Watts/1/hr	699 0.725	788 8.762	644 44.690	

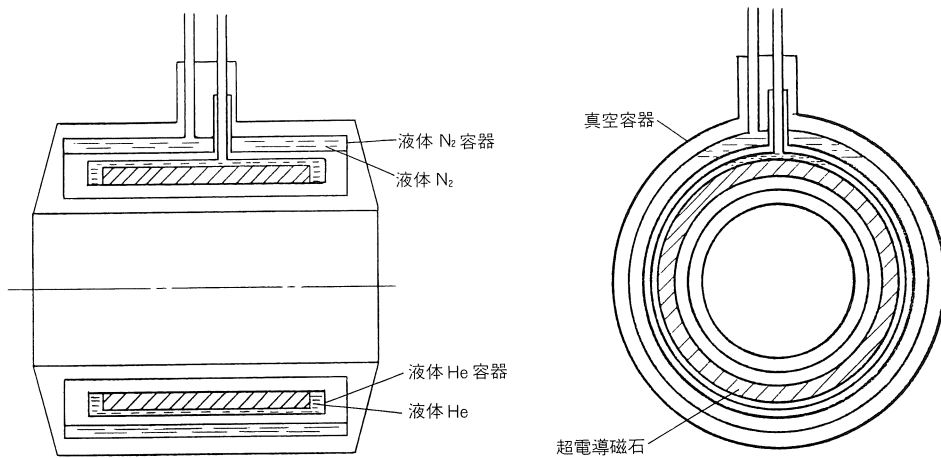


図 1 開放型クライオスタット

あることは前述したが、表 1 に He の物性値<sup>2)</sup> を表す。大気圧における沸点温度 4.215 K の液体 He を貯蔵するには蒸発潜熱が 20.91 J/g とガス中でもっとも小さく、1 ワットの熱侵入量に対して約 1.4 l/時の液体 He が蒸発してしまうため、超電導磁石を収納するクライオスタットは外部からの熱侵入量を少なくするよう設計されている。

一般的に全身用として使用されている開放型クライオスタットの場合、5つの主要要素から構成されている(図1)。

① 外部真空容器：システムの構造的強度を持たせ、内部を真空に保持するための気密性を有する横型二重円筒容器で、ステンレス鋼またはアルミニウムの非磁性材料を使用している。

② 液体 N<sub>2</sub> 容器：外部からの侵入熱が直接液体 He 容器に入らないよう液体 He 容器の周囲を液体 N<sub>2</sub> 容器で囲み、液体 N<sub>2</sub> の冷媒で外部入熱を抑えている。外部から液体 N<sub>2</sub> 容器への熱侵入量は液体 N<sub>2</sub> の蒸発速度により測定できる（表 1 に N<sub>2</sub> の物性値を示す）。

③ 液体 He 容器：超電導磁石および磁石の支持材を収納し液体を貯蔵することにより、超電導状態における安定した均一高磁界を得ることができる。液体 He の消費量は、容器内部に超電導液面計センサーが内蔵され、必要に応じ液体 He の位置を検出することによりわかる。

④ 輻射熱シールド板：液体 N<sub>2</sub> 容器を液体 He 容器の周囲すべてに覆うことは難しく、液体 N<sub>2</sub> 容器より熱伝導性の良い材料で液体 He 容器を覆い、外部からの輻射熱が直接液体 He 容器に入らないようにする。通常、液体 N<sub>2</sub> 容器、液体 He 容器および輻射熱シールド板の外表面には、各部に対する熱侵入量をより低減させるため多層断熱材 (super insulation) を施行している。

⑤ 各種冷媒配管、電気系取出：①～④以外に液体 He、液体 N<sub>2</sub> の充填、放出配管系があり、外部真空容器から取り出すことになる。また、液体 He、液体 N<sub>2</sub> の液面計センサーなどの電気計測関係あるいは超電導磁石に対する電流リードなどは同じ外部真空容器から取り出す。

開放型クライオスタットの液体 He 容器には外部から種々の経路を経て熱侵入があるが、大半は輻射熱侵入である。通常、全身用装置の場合、液体 He の蒸発速度は 0.3～0.5 l/時（熱侵入量としては 0.23～0.36 ワットとなる）、液体 N<sub>2</sub> の蒸発速度は 1～2 l/時（44.7～89.4 ワット）である。

仮りに液体 He の蒸発速度を 0.3 l/時とし、40 日毎に補充し、補充時の移送ロスを補充量の 30% とする。また、液体 N<sub>2</sub> の蒸発速度を 1 l/時として 2 週間毎に補充し、補充時の移送ロスを補充量の 10% とすると、これらの条件による年間消費量は、液体 He 約 3,400 l、液体 N<sub>2</sub> 約 9,600 l と

なる。

### 3 冷凍機を利用した冷却システム

通常開放型クライオスタットの場合、前述のように大量の液体 He および液体 N<sub>2</sub> を消費する。このため従来から冷凍機による冷却システムの検討はされていたが、MRI 装置の操作を簡易化し信頼性を確保する上から使用されるまでにいたっていなかった。しかし最近、He 冷凍機の連続運転性能も向上し、MRI 装置の超電導化傾向に伴い冷凍機による冷却システムの開発が盛んである。

オランダ Philips 社では、自社のスターリング冷凍機を使用し、液体 He、液体 N<sub>2</sub> の消費量を少なくする冷却システムを付属した超電導 MRI 装置を製造している<sup>3)</sup>。また、冷凍機メーカーである米国 Koch 社は、従来の標準型 He 液化冷凍機を MRI 装置用に改良し、液体 He 容器へ He ガスを液化供給あるいは再凝給できるようにしている。米国の移動診断車の MRI 装置にこの冷却システムを搭載している例がある。さらに、西独 Leybold Heraeus 社<sup>4)</sup>などの冷凍機メーカーおよび Oxford Instruments 社などの超電導磁石メーカーにおいては、MRI 装置の超電導化に対応し種々の冷却システムの開発が行われている。日本においても、MRI 装置メーカーが自社製超電導磁石のクライオスタットに冷凍機を使用した冷却システムを検討しており、冷凍機メーカーも含めて冷却システムの開発が活発化している。住友重機械工業(株)は小型 He 冷凍機による再凝縮冷却システムを開発し実際の装置に取り付けている。

表 2 にこれらクライオスタットの冷却システムの区分を示す。開放型クライオスタットのより低侵入型の開発は今後継続されると思われるが、以下に冷凍機を利用した冷却システムの概要を述べる。

表 2 クライオスタット冷却システムの区分

区分	クライオスタット内冷媒	冷凍機配置	冷凍機到達温度(K)	LN <sub>2</sub> 容器	冷却部				蒸発量 (1/hr)		開 発 状 況	図
					LN <sub>2</sub> 再凝縮	77K シールド板	20K シールド板	LHe 再凝縮	LN <sub>2</sub>	LHe		
A	開放型	—	—	有	—	○	—	—	1~2	0.3~0.5	完	1
B	半密閉型	直付型	77	無	—	○	—	—	不要	0.3~0.5	完	—
C			77	有	○	—	—	—	0	0.3~0.5	完	3
D			20	無	—	○	○	—	不要	0.1~0.2	完	2
E			20	有	○	—	○	—	0	0.1~0.2	開発中	—
F			4(注1)	有	—	—	—	○	1~2	0	完	9
G			別置型	20	無	—	○	○	—	不要	0.1~0.2	完
H	全密閉型	別置型	4(注2)	有	○	○(注4)	—	○	0	0	完	6
I			別置型 (20K)	無	—	○	○	—	不要	0	開発中	—
J			直付型 (4K)	—	—	—	○	—	0	0	開発中	7
K			直付型	20(注3) & 4	有	○	○(注4)	○	—	0	0	開発中

(注 1) この 4 K の冷凍機は LHe 再凝縮熱交換器挿入型を表す。

(注 2) この冷凍機は蒸発 He ガスを再液化する液化機型もある。

(注 3) 20 & 4 K とあるのは独立の冷凍機を持つことを表す。

(注 4) LN<sub>2</sub> 再凝縮の場合は 77 K シールド板冷却はない。

## 1 77 K および 20 K の冷却システム

### a 冷凍機直付型

この方式は半導体製造装置など、クライオポンプ用として世界的に盛んに使用されている一段または二段蓄冷器方式のギフォード・マクマホンサイクルあるいはソルペーサイクルなどの小型 He 冷凍機を利用し、77 K または 77 K と 20 K 温度ステージの輻射熱シールド板を直接冷却する方式である (表 2 区分 B, 表 2 区分 D, 図 2)。この他、液体 N<sub>2</sub> を設けた状態で液体 N<sub>2</sub> の蒸発ガスを内部で再凝縮させる方式もある (表 2 区分 C, 図 3)。これらの方式は液体 N<sub>2</sub> の蒸発量をなくすか、または液体 N<sub>2</sub> の使用をなくすことに主眼があり、液体 He 容器の液体 He の蒸発速度はそのままか、または低減するが、He ガスは大気放出の状態にある。

### b 冷凍機別置型

この方式は別置きにした冷凍機から冷媒を循環させ、液体 He 容器の外側に配置した 77 K および 20 K 温度ステージ輻射熱シールド板を強制的に冷却する方式である (表 2 区分 G, 図 4)。この方式によれば液体 N<sub>2</sub> は必要なく、液体 He の蒸発速度を低減することが可能である。

## 2 液体 He 再凝縮冷却システム

液体 He 容器内の液体 He の蒸発は外部からの熱侵入があるため基本的になくすことはできない。しかし、この蒸発する約 4.2 K の He ガスをその蒸発ガスの温度以下の接触面に熱伝達させることにより、低温状態で再凝縮液化させることが可能である。4 K 冷凍機はこの目的で使用されるわけである。

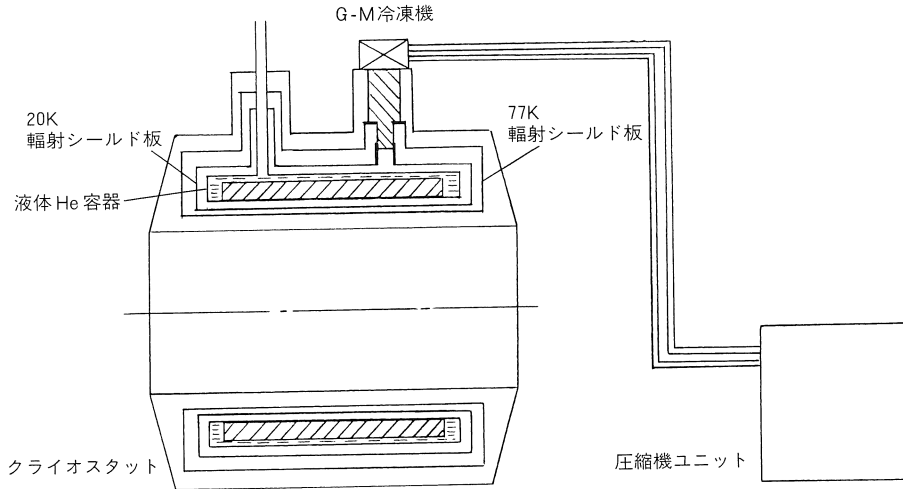


図 2 冷凍機直付型輻射シールド板冷却システム

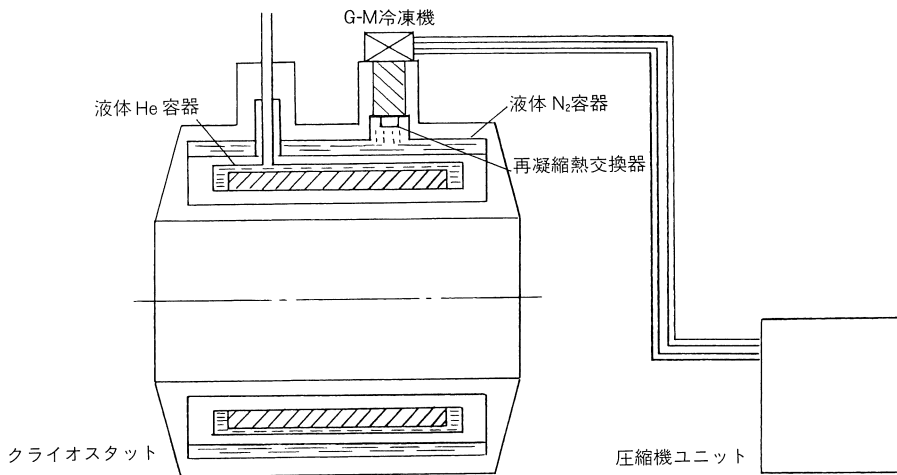


図 3 冷凍機直付型液体 N<sub>2</sub> 再凝縮冷却システム

**a 冷凍機直付型**

冷凍機直付型には、後で詳述する再凝縮熱交換器挿入型とクライオスタット内蔵型がある（表 2 区分 F, 図 9, 表 2 区分 K, 図 5）。

後者の場合、クライオスタット外部真空容器真空層部に蓄冷器式冷凍機と熱交換器を配置し、再凝縮熱交換器を液体 He 容器 He ガス層部に設け

て配管接続したものなど種々方式が考えられるが、クライオスタット組込み時の取り合いなど製造上の問題、あるいは保守性など、開発に時間を要すると思われる（表 2 区分 K, 図 5）。

**b 冷凍機別置型**

この方式は冷凍機そのものはクライオスタットとは別に配置され、トランスファーチューブを通

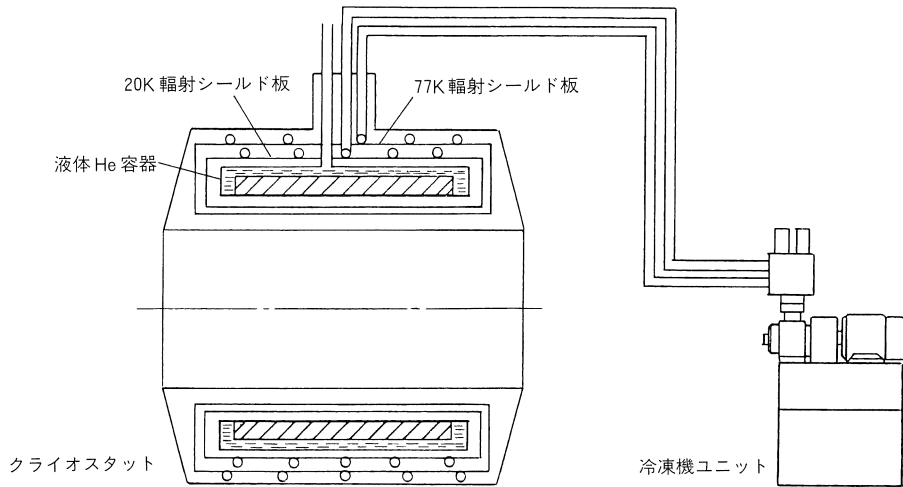


図 4 冷凍機別置型輻射シールド板冷却システム

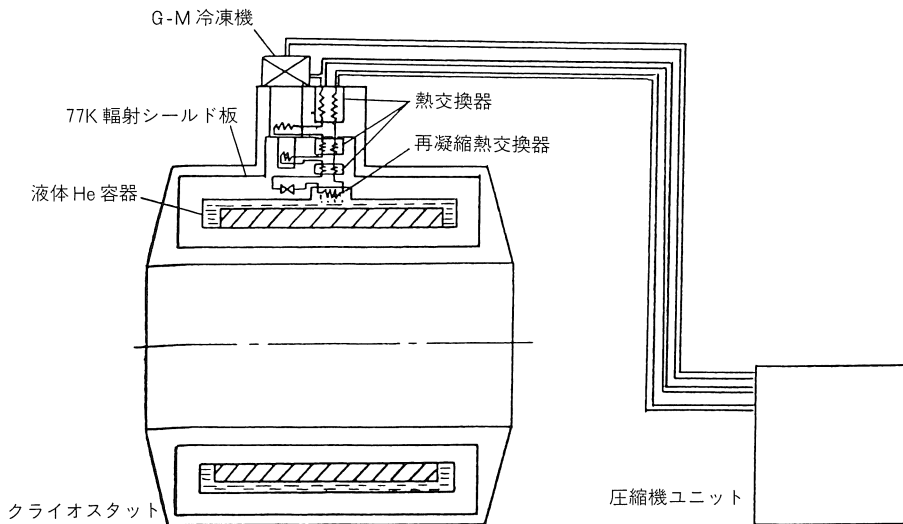


図 5 冷凍機直付型液体 He 再凝縮冷却システム

して 4 K 冷媒 He ガスを液体 He 容器再凝縮熱交換器へ移送され、閉サイクルにて冷凍機の熱交換器を経由して圧縮機へ戻る。また同時に、50~70 K の He ガス冷媒を輻射熱シールド板に接触させた配管内に強制循環冷却しているか、または液体 N<sub>2</sub> 容器の再凝縮熱交換器を通して N<sub>2</sub> ガスの再

凝縮液化を行っている (表 2 区分 H, 図 6)。

### 3 複合型冷却システム

この方式は、前記した 1 台の冷凍機ではなく独立した冷凍サイクルをもつ 2 台の冷凍機を使用する冷却システムである。これには 20 K および 4 K ステージの冷凍機を各 1 台ずつ使用し、4 K

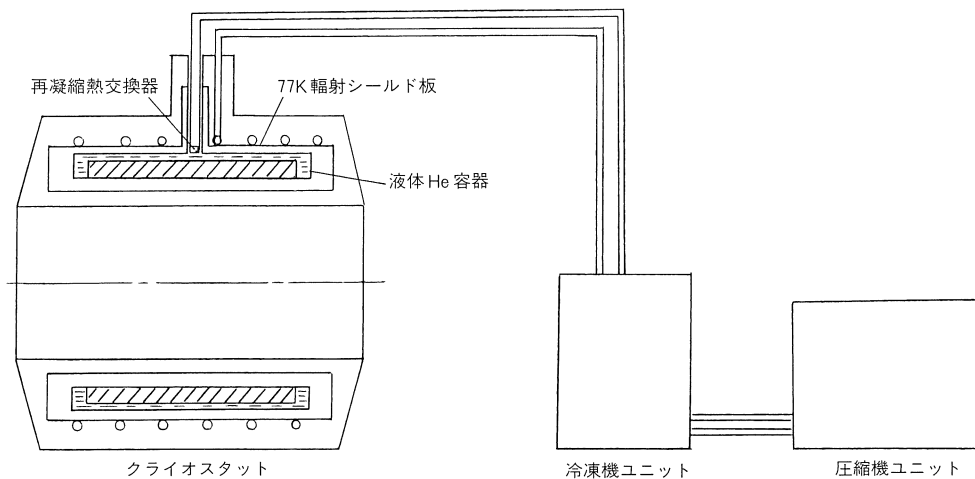


図 6 冷凍機別置型液体 He 再凝縮冷却システム

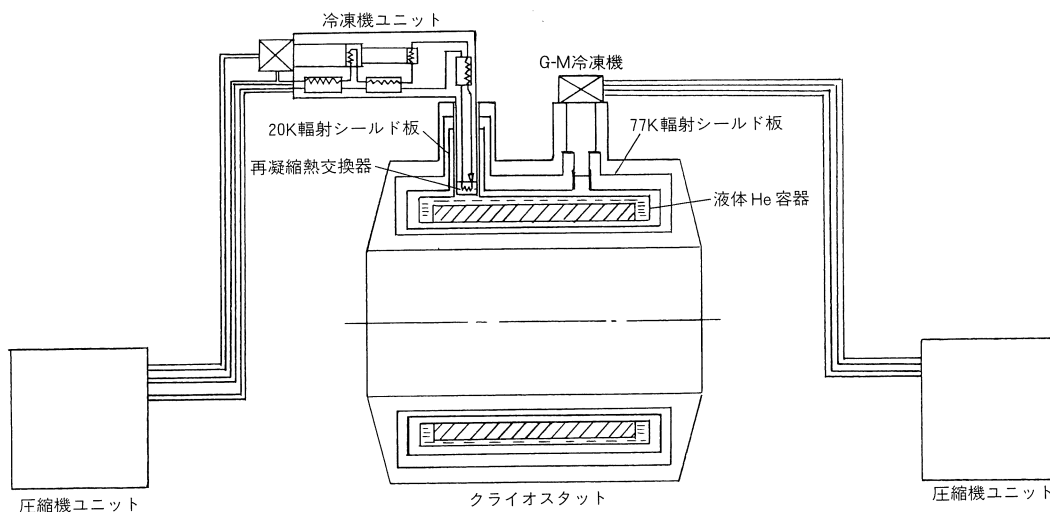


図 7 冷凍機複合型冷却システム

冷凍機はクライオスタットに取り付け、20 K 冷凍機をクライオスタットまたは別置きに配置している (表 2 区分 I, 表 2 区分 J, 図 7)。これらの方式によれば、液体  $N_2$  は不要もしくは蒸発をなくし、液体 He の蒸発もなくすることが可能である。

#### 4 再凝縮熱交換器挿入型 4 K 冷凍機冷却システムの概要

ここでは、既述した各冷却システムの中で、4K 冷凍機の再凝縮熱交換器をクライオスタットに挿入固定し、液体 He の蒸発をなくした冷却システムの実例があるので紹介する。



本冷却システムは東レ・富士・ピッカーインターナショナル(株)が千葉大学医学部附属病院に納入

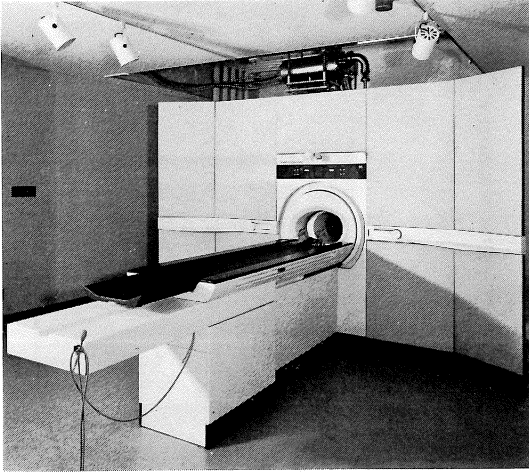


図 8 冷凍機付 MRI クライオスタット  
(千葉大学医学部附属病院)

した 0.5 テスラの超電導 MRI 装置のクライオスタットに住友重機械工業(株)製の 4 K 冷凍機を設置し、1986 年 3 月より稼動を開始し、実際の診療に寄与している (図 8)。

#### a 冷却システムの概要

本冷却システムの特徴は、クライオスタットの超電導磁石用既設電流リード挿入口を利用し、冷凍機トランスファーチューブ先端に設けた再凝縮熱交換器を液体 He 容器ガス相部に挿入し、蒸発する He ガスを再凝縮液化し、初期に充填した液体 He の損失をなくしている。液体  $N_2$  の蒸発に関しては従来のまま大気開放状態にしている。

本冷却システムの構成は、図 9 に示すように冷凍機ユニットと圧縮機ユニットおよび各ユニットを接続する配管より成っている。冷凍機ユニット

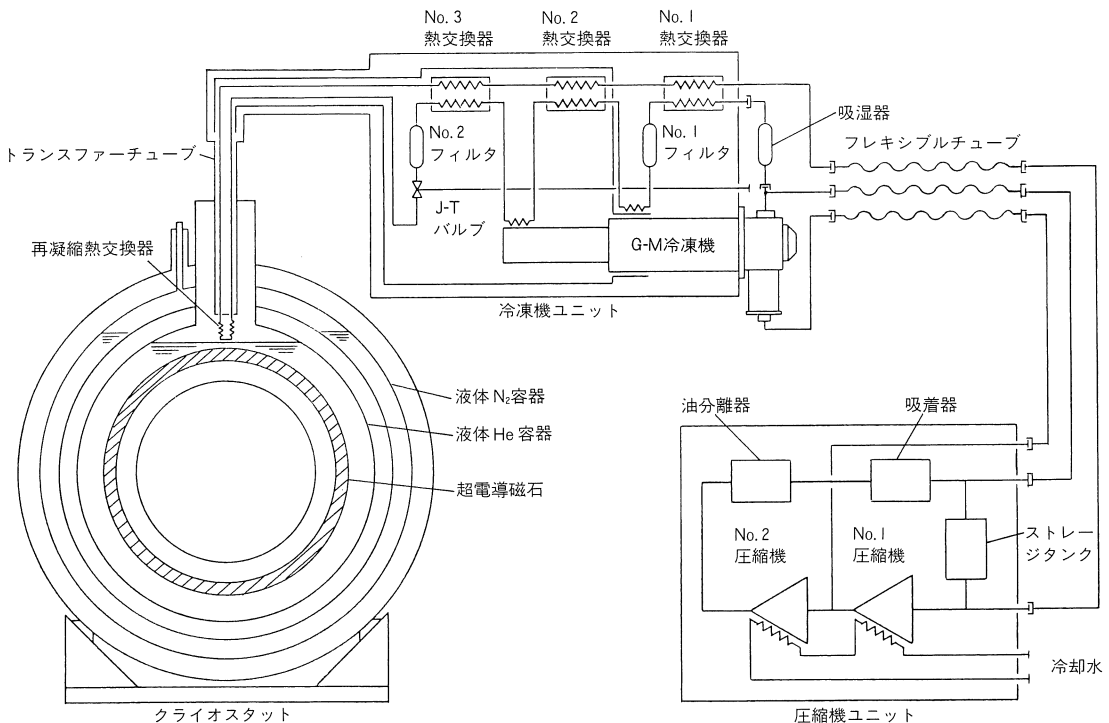


図 9 再凝縮熱交換器挿入型 4K 冷凍機冷却システム

には真空断熱されたトランスファーチューブとその先端に再凝縮熱交換器を一体型で配置し、クライオスタット上部の天井に取り付けたリフターにより昇降移動している。圧縮機ユニットは別室に配置され、クライオスタットの冷凍機ユニットと固定配管およびフレキシブルチューブにて接続されている。

冷却方法としては、超電導磁石を励磁した後冷凍機本体を移動し、再凝縮熱交換器を電流リード挿入管より挿入し先端を液体 He ガス相部に配置固定する。この状態で冷凍機の運転を行う。圧縮機ユニットで昇圧した高圧 He ガスは冷凍機ユニットのジュールトムソン弁 (J-T 弁) により低圧低温の He ミストとなり、トランスファーチューブ先端の再凝縮熱交換器を冷却する。液体 He 容器ガス相部の冷凍負荷を吸収した低圧低温 He ガスはトランスファーチューブ、冷凍機ユニットの熱交換器を通り圧縮機ユニットに戻る。冷凍機系の He ガスラインはクライオスタット液体 He 容器の He ガスラインとは独立しており、完全な閉サイクルシステムとなっている。

液体 He 容器内における He ガスの再凝縮システムとしては、次のようになっている。液体 He 容器は初期には大気開放状態であるが、再凝縮熱交換器が最低到達温度 (4.3 K) に達し、液体 He 容器の He ガス大気放出ラインを封じ切ると容器内圧が徐々に上昇する。この内圧が再凝縮熱交換器内圧力を越える (約 1.15 atm) と、容器内 He ガス温度が再凝縮熱交換器の温度より高くなり He ガスの凝縮が開始される。凝縮が始まると、容器内圧上昇は停止し一定圧力に保持され、液体 He の消費量をなくすることができる。

### b 主要機器の概要

① 冷凍機ユニット：冷凍機ユニットは、改良型ギフォード・マクマホンサイクル冷凍機にジュールトムソン回路を付加した冷凍機である。冷凍能力は 4.3 K で 3 ワット (50 Hz) である。

冷凍機ユニットは磁界中に設置されるためステ

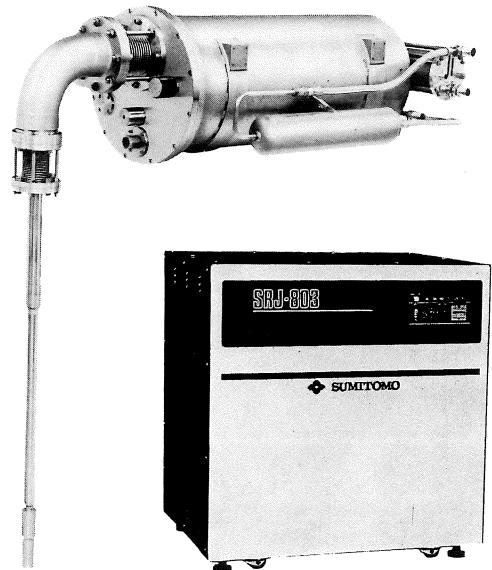


図 10 再凝縮熱交換器付 4K 冷凍機 (住友重機械工業株式会社製)

ンレス鋼などの非磁性材料を使用しているが、G-M 冷凍機の駆動モーターは磁性材料で構成されるため、冷凍機ユニット設置後シミングを事前に実施し、実際の磁界約 300 ガウス中では画像などにおける問題は出ていない。なお、この冷凍機ユニットに使用している G-M 冷凍機は 0.1 テスラの磁界中でも連続運転は可能である。図 10 に冷凍機ユニットの外観を示す。

② 圧縮機ユニット：圧縮機ユニットは 2 台の回転式圧縮機による 2 段圧縮方式を採用している。高圧 He ガスは冷凍機ユニット入口で G-M 回路と J-T 回路に分流されるが、G-M 回路は No. 2 圧縮機吸入側に中圧となって戻り、J-T 回路は No. 1 圧縮機吸入側に低圧となって戻り循環圧縮を行っている。圧縮機ユニットには圧縮機ユニットの冷却系および油分離器、吸着器を収納し、室温のクリーンな高圧 He ガスを冷凍機ユニットに供給できる長時間運転可能なシステムとなっている。

#### 4 おわりに

以上、MRI 装置の超電導化傾向に伴い従来の開放型クライオスタットから冷凍機を利用した冷却システムにわたって、その概要を述べた。表 2 に示したように冷却システムによってはまだ開発中のものもあり、また、開発完了といっても、実際の装置によりどの程度評価されているか不明な点が多い。

世界的に従来の常電導式から超電導式に取って変わる今日の情勢の中で、各冷却システムの開発はいまだ緒に着いたといっても過言ではなく、開発のテンポはさらに速くなるものと推測される。今後は、長時間信頼性、保守性、低振動、低騒音、

低ノイズ、耐磁界性能などを考慮し、フィージビリティ・スタディの中からユーザのニーズに合った装置の開発が活発に行われるものと思われる。

#### 文 献

- 1) D. Larbalestier, et al.: Physics Today J., 24: (March) 1986.
- 2) 低温工学協会・訳：低温工学ハンドブック，内田老鶴圃新社，1982，pp. 26-27.
- 3) G.J. Haarhuis: Proc. 10th International Cryogenic Engineering Conference, pp. 117-120, 1984.
- 4) H.J. Forth: Proc. 11th International Cryogenic Engineering Conference, 1986.