

(解説)

超電導マグネットと省ヘリウム

Superconducting Magnet and Helium Conservation



伊藤 聡*¹ (博士(工学))
Dr. Satoshi ITO

Superconductor technology is not only a dream technology for linear motor car application, but also a practical technology in medical use for MRIs and for NMR for chemical analysis. However, the superconducting phenomenon appears at cryogenic temperatures, such as that of liquid helium (-269 degrees Celsius or 4.2 Kelvin); helium is an essential material for superconductor applications. On the other hand, helium is a limited underground resource and, in the worst-case scenario, may run out in about 100 years. Japan Superconductor Technology is producing and selling superconducting wire and magnets. Therefore, it is important to ensure business continuity and stability in the event of a future helium crisis. This paper describes the present situation and future prospects for helium resources, and also describes techniques for helium conservation, such as helium recycling and using low helium consumption magnets and cryogen-free magnets.

まえがき = 最近、リニアモーターカーなどの話題とともに、「超電導」という言葉を耳にする機会が増えてきた。超電導マグネットは、非常に強い磁場を発生できることから、医療用MRIや分子構造分析用NMR、また実用化が進められているリニアモーターカーなどにおいて、必須技術となっている。ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株) (以下、JASTECという) は、「超電導」に関連する製品として、超電導線材と超電導マグネットの製造・販売事業を展開している。

超電導現象は、液体ヘリウム温度である-269℃(4.2K)において発現する。液体窒素温度(77K)で使える高温超電導材料も発見されているが、工業的には実用に至っていないのが現状である。このため、現状の超電導機器は、ヘリウムと切っても切れない関係にある。そのヘリウムは有限な地下資源であり、近年その需給がひっ迫している。テーマパークなどでの風船の販売が一時期中止されたことは記憶に新しい。

本稿では、このようなヘリウム資源の状況と、それに対するJASTECでの省ヘリウム商品の開発をはじめとするヘリウム消費量節減への取り組みを紹介する。

1. ヘリウム資源と需給

1.1 ヘリウム資源

ヘリウムは、周期表のなかで水素に続いて二番目に位置づけられる無色・無臭・不活性の元素である。その比重の小ささから、風船や飛行船に利用されたり、単原子分子である(音速が早い)ことから、アヒルのような声色を出す遊具に使われたりするように、日常でも馴染み深い。そのヘリウムは産業界でも多く用いられ、用途は

図1に示すように多岐にわたる。現在の国内のヘリウム消費量は、年間1,000万m³(ガス換算)にのぼり、超電導用途であるMRIやNMRが全消費量の1/4を占めている。

ヘリウムは19世紀後半に太陽光の分光分析によって存在が見出された。このため、ギリシャ語の太陽を意味するヘリオス(Helios)が名前の由来になっている。太陽光からヘリウムが観測されるのは、ヘリウムが核融合反応に伴う産物だからである。現在地球上で産出されるヘリウムも、地殻内での核分裂反応によって生成されたと考えられている。地殻内で発生したヘリウムが地表に至るまでの期間は約500万年といわれ、かつ、地表に至れば、比重が小さいゆえに宇宙空間に散逸してしまう。このため、ヘリウムも化石燃料と同じく有限な地下資源といえる。近年、究極のクリーンエネルギー源開発として、国際熱核融合実験炉(ITER)プロジェクトが進められている。この人工的な核融合プロセスからもヘリウムが発生するが、地殻内での核反応規模・蓄積時間に比較すれば、その発生量は産業的には成立しえない微量にとど

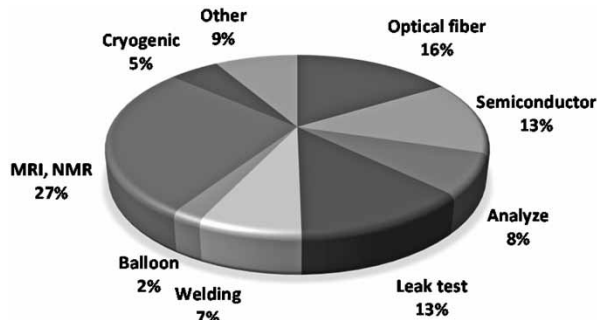


図1 国内におけるヘリウムの用途¹⁾
Fig.1 Application of helium in Japan¹⁾

*¹ ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー(株) マグネット工場

まると推測される。

ヘリウムは地殻内で生成されるため、国内も含めて世界中の大半の天然ガスに含まれている。しかし、それを商業的に抽出・生産するには、0.3%以上の含有率が必要とされ、この条件を満たす天然ガス田は極めて限られてくる。代表的な産出国は、米国、カタール、アルジェリア、ロシアなどであり、それぞれの推定埋蔵量を図2に示す²⁾。世界には500億 m^3 近くの埋蔵量があるが、ガス田での採掘時のロスなどから、実際に利用可能な量はその半分程度にとどまる。一方、世界のヘリウム年間需要は2億 m^3 であり、今後も伸長していくことが予想される。このことから、ヘリウム資源は早ければ今後100年程度で枯渇してしまう恐れがある。

1.2 ヘリウム需給の現状と将来

ヘリウムが採掘されるようになった20世紀初頭、その用途は軍事目的の飛行船であった。このため、当時（およびその後一世紀にわたり）唯一のヘリウムの産出国であった米国は、ヘリウムを軍事物資と位置づけ、各ガス田を結ぶパイプラインを敷設したうえで、産出したヘリウムガスの一部を地下岩盤内に備蓄する政策のもと、アメリカ土地管理局（Bureau of Land Management: BLM）が一元管理してきた。

しかし、時代とともに軍事物資としての意義は薄れ、同時にBLMによる施設維持管理費用が問題視され、半世紀以上にわたる備蓄（約10億 m^3 ）を民間放出する法案が1996年に可決された。この政策転換によって放出された備蓄が供給安定化のためのバッファ機能となった反面、BLMの投じた費用の回収コストが上乗せされたことにより、ヘリウムの市況価格上昇を招く結果となっている³⁾。事実、国内のヘリウム価格は、この5年間に2倍以上上昇した。それでもヘリウム需要は、図3に示す

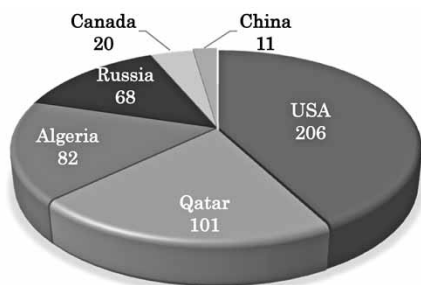


図2 世界のヘリウム埋蔵量（単位：億 m^3 ）²⁾

Fig. 2 Crude of helium resources in the world²⁾ (unit: 100 million cubic meters)

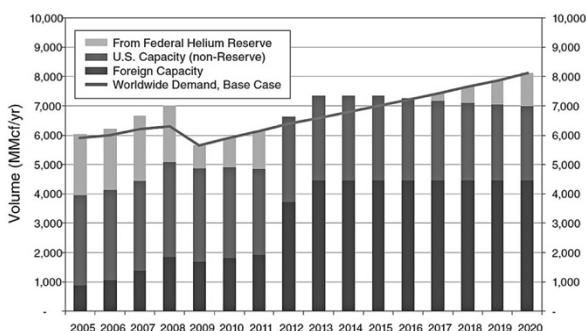


図3 ヘリウム需給の現状と将来⁴⁾
Fig. 3 Demand and supply of helium⁴⁾

ように、今後とも伸長傾向が続くと予想される⁴⁾。当面はBLM備蓄の切り崩しも併せて、需給バランスは維持できると考えられる。しかしながら、先に述べたヘリウム資源そのものの先行き不安、ヘリウム含有率がほぼゼロのシェールガスの市場拡大とそれによる在来型天然ガスの減産傾向から、ヘリウムの供給不安が消えることはない。そこに天然ガスパラントの操業トラブルが重なると、たちまち需給がひっ迫する事態となってしまう。このような状況が数年ごとに繰り返されながら価格が上昇の一途をたどっているのが最近のヘリウム事情である。

2. 超電導マグネットとヘリウム

超電導マグネットは通常、液体ヘリウムに浸漬（しんし）され、4.2Kという極低温に維持されて用いられる。本章では、このような環境を必要とする背景とその維持方法について、超電導の特性と超電導マグネットの冷却構造の視点から解説する。

2.1 超電導特性

ある種の金属材料は、温度を下げていくと、ある温度で急激に電気抵抗を消失する現象を示す。これが超電導現象である。電気抵抗がゼロであるから、例えば断面積1 mm^2 の超電導線に1万Aもの大電流を流すことすら可能となる（通常の銅線は10A程度）。ただし、その特性である臨界電流密度 J_c は、温度と磁場に大きく依存する。

代表的な超電導材料であるニオブチタン（NbTi）の特性を図4に示す。図中において、温度軸（T）および磁場軸（B）の最大点は、それぞれ臨界温度 T_c および臨界磁場 B_{c2} といい、NbTiであればそれぞれ、9.2K、14.5T（T(テスラ)は磁束密度の単位、1T=1Wb/ m^2 =10⁴G(ガウス))である。

超電導現象の発現域は、臨界面とよばれるこれらの範囲内に限定される。とくに温度環境を維持するには、液体冷媒に浸漬することが効果的であるが、NbTiの T_c は水素の沸点（20.4K）を下回るため、液体ヘリウム（沸点4.2K）が唯一の冷却媒体となる。これが、超電導マグネットがヘリウムとは切っても切れない関係にあるゆえんである。

2.2 超電導マグネットおよびクライオスタット

ここでは、液体ヘリウムに浸漬して用いる超電導マグネットの概略の構成を紹介する。図5は、NMR用超電導マグネットの構成を示している。超電導マグネット

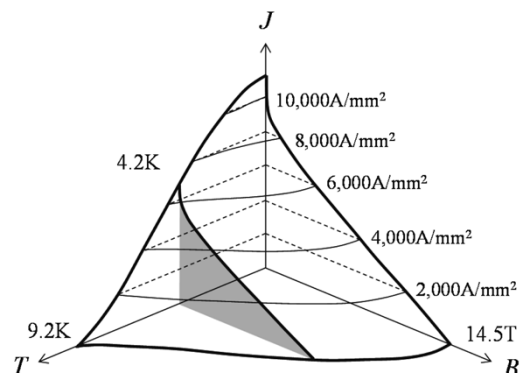


図4 NbTi超電導材料の超電導特性

Fig. 4 Typical property of NbTi superconductor

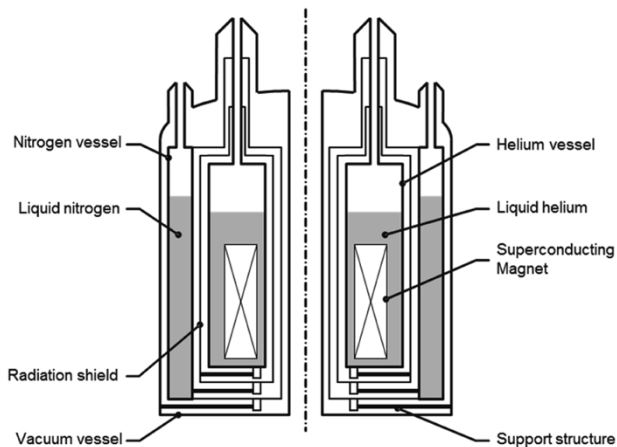


図5 超電導マグネットの断面構造
Fig. 5 Structure of superconducting magnet

は、液体ヘリウムを貯めたヘリウム槽に配置され、4.2Kに冷却される。液体ヘリウムの蒸発潜熱は非常に小さく(20J/g)微量な入熱でも蒸発することから、超電導装置を長時間連続使用するためには、ヘリウム槽への熱侵入を極力減らさなければならない。このためヘリウム槽は、真空断熱によって気体分子を介した熱伝導が低減されている。さらに、常温の真空槽からはふく射伝熱もあり、これを遮へいするため、ヘリウム槽を覆うように配置した液体窒素槽を設けることが多い。このように、極低温を維持するための工夫が施された容器はクライオスタットとよばれる。

クライオスタットに収められた超電導マグネットは、外部から電流供給することで磁場を発生する。コイルに給電した後、液体ヘリウム中に設置したスイッチを閉じることで閉回路を形成し、コイルには半永久的に電流が流れ続ける。電流が流れる経路は、スイッチも含めて全て超電導材料で構成されているため、抵抗成分によるジュール発熱も無視できる。したがって、貯蔵した液体ヘリウムの保持期間はクライオスタットの断熱性能のみによって決まる。JASTECが製造するNMR用マグネットの場合、液体ヘリウムの蒸発速度は、10~20cc/h(液換算)である。一例として、小型のNMRマグネット(型式名JJ400YH)では、120Lの液体ヘリウム貯液量に対し、蒸発速度が12.7cc/hであり、1年間の無補給運転が可能である。

3. JASTECにおける省ヘリウムの取り組み

液体ヘリウムを用いなくても超電導現象を得られる新材料として、液体窒素温度(77K)でも超電導現象を示す酸化物系高温超電導体(High Temperature Superconductor)や、液体水素温度(20K)での利用可能性があるほう素系超電導体MgB₂などがある。しかしこれらの新材料は、実用化までにいくつものブレイクスルーが必要である。したがって、少なくとも今後10~20年は、既存のNbTiやNb₃Sn(ニオブ3すず)などの超電導材料を選択し、かつ液体ヘリウムを用いた運用をせざるを得ない。

このような状況のもと、液体ヘリウムを安定的に確保する方策は、使用量を減らすことと、リサイクルすることに尽きる。以下に、JASTECにおけるこれらの方策へ

の具体的な取り組みを述べる。

3.1 ヘリウムリサイクルシステム

JASTECのマグネット製造工場で消費する液体ヘリウム量は、年間約10万リットルである。その消費量の内訳を、典型的な機種である400MHz-NMRマグネット1台あたりを示したのが図6(a)である。このマグネットの製造には約300リットルの液体ヘリウムを使用するが、製品に貯液して出荷されるのはその1/3に過ぎず、それ以外はマグネットの初期冷却や検査中の消費に使われている。つまり、工場内で消費されたヘリウムを回収して再液化することにより、図6(b)のように、入手すべき液体ヘリウム量は、理想的には出荷分だけで済む。

これを実現するのが、ヘリウム液化機を含むリサイクルシステムである。高額な装置であるが、最近のヘリウム価格高騰によって投資効果が見合う状況となり、JASTECでは2014年3月に導入を完了した。導入したシステムの概略のフローを図7に、主要仕様を表1に示す。中心となるヘリウム液化機は、Linde社製であり、1時間あたり約100リットルのヘリウム液化能力を有する。液化対象となるヘリウムガスは工場内で回収されたガスであり、リサイクルシステムにおいては、いかに回収率を向上させるかがキーとなる。システムの導入に伴って工場にはガス回収配管を敷設したが、現段階での回収率は約70%にとどまっている。今後、運用面での改善を加え、回収率100%を目指していく計画である。

3.2 ゼロボイルオフ型超電導マグネット

マグネット運用時のヘリウム消費量を低減する手段として、極低温小型冷凍機をマグネットに搭載することによって液体ヘリウムの蒸発をゼロにするゼロボイルオフ方式がある。図8にその概念を示す。冷凍機の先端部分

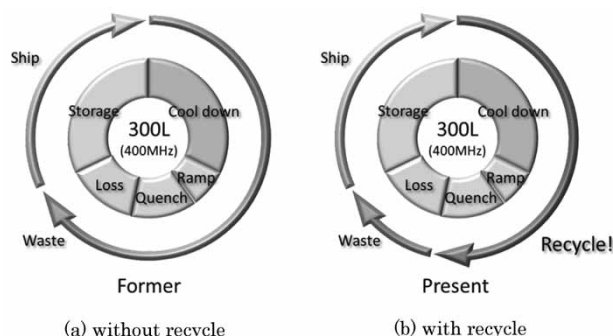


図6 400MHz-NMRマグネット製造工程におけるヘリウム消費内訳
Fig. 6 Helium consumption in manufacturing of 400MHz-NMR magnet

表1 ヘリウムリサイクルシステムの仕様
Table 1 Typical specification of helium recycle system

Name of Component	Specified Performance
Helium Liquefier	80-107 L/h
Helium Compressor	Inlet P=0.005 MPa, Outlet P=0.9 MPa
Buffer Tank	10 m ³ × 0.85 MPa × 2 sets
Gas Bag	100 m ³
Recovery Compressor	100 m ³ /h
Gas Curdle	0.5 m ³ × 14.7 MPa × 30 cylinders
Liquid Helium Tank	3334 L
Liquid Nitrogen Tank	9735 L

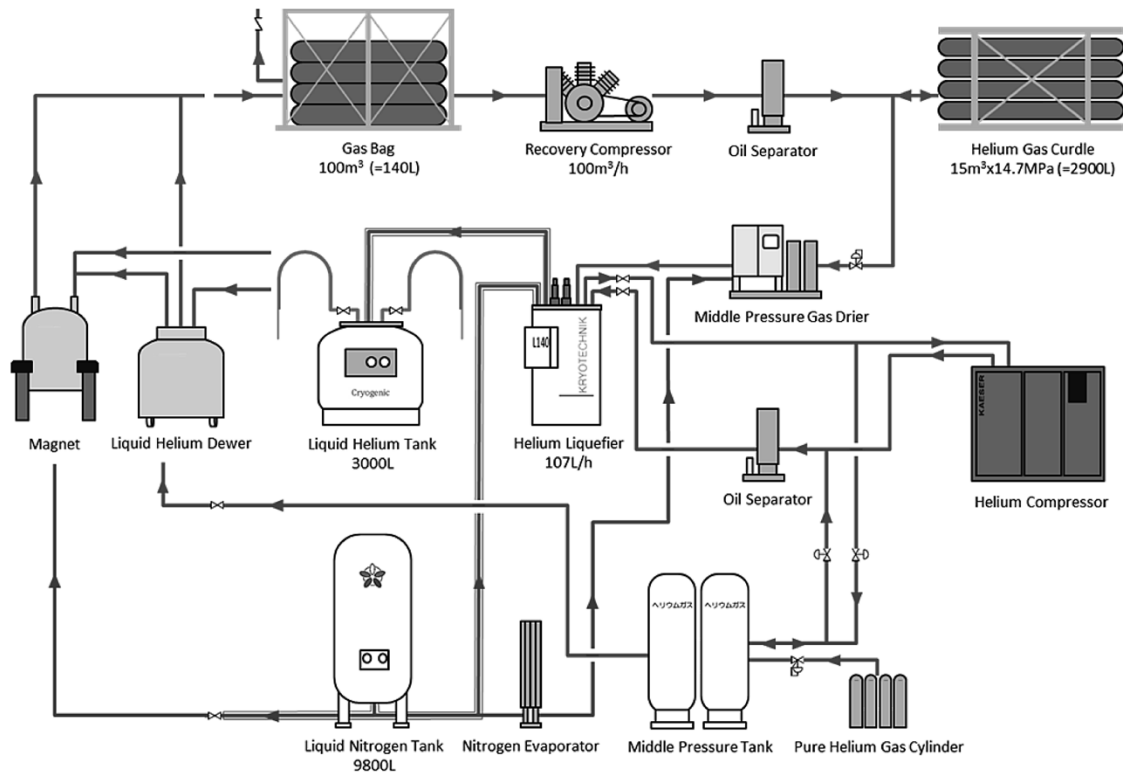


図7 ヘリウムリサイクルシステムのプロセスフロー図
Fig. 7 Schematic of process flow diagram of helium recycle system

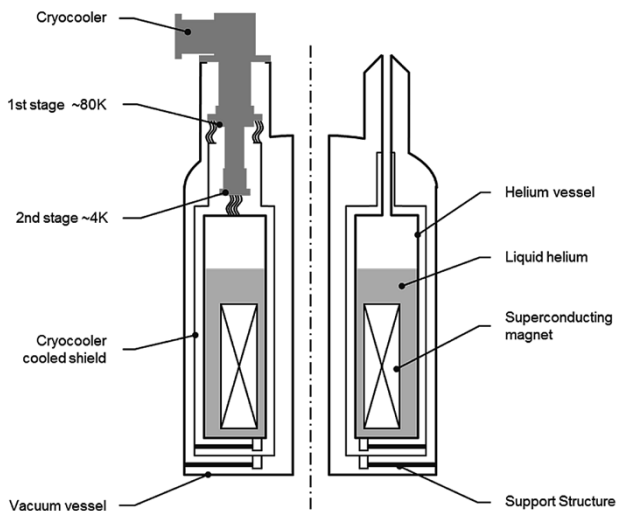


図8 ゼロボイルオフ型超電導マグネットの概念図
Fig. 8 Schematic structure of zero-boiloff magnet



図9 ゼロボイルオフ型NMRマグネット (ZB-400)
Fig. 9 Zero-boiloff NMR magnet, ZB-400

は4K以下の温度に冷却されるため、蒸発したヘリウムはここで再液化される。結果としてクライオスタット系外に放出されず、冷凍機が稼働している限りゼロボイルオフを維持できる。この方式は、MRIでは既に一般的なものであり、JASTECのMRI製品でも採用している。しかし、MRIより格段に繊細な測定を行うNMRでは、冷凍機の振動ノイズがNMR信号に影響を及ぼすため、これまでゼロボイルオフ型の採用が見送られてきた。

そこでJASTECは、冷凍機の振動絶縁機構を開発することにより、ゼロボイルオフ型NMRを上市した。図9は400MHz-NMRのゼロボイルオフ型であるが、今後はさらに振動に敏感な上位機種にも適用を拡大していく予定である。

3.3 無冷媒型超電導マグネット

蒸発量をゼロにするだけでなく、液体ヘリウムそのものを使用しない究極的な構成を採用するのが無冷媒型超電導マグネットである。図10にその構造を示すように、ゼロボイルオフ型と同様の極低温小型冷凍機を用い、高熱伝導体(銅など)を介して冷凍機をマグネットに接続・冷却する仕組みである。もはや液体ヘリウム自体が存在しない。

JASTECでは、20年前よりこのタイプのマグネットを開発し^{5),6)}、これまでに世界に200台を超える納入実績を持つ。無冷媒型は、液体ヘリウムを必要としないことから簡便な操作性という特徴を持ち、もっぱら磁場応用研究などに用いられている。図11の写真は、核融合炉へのエネルギー注入に用いるジャイロトロン用マグネッ

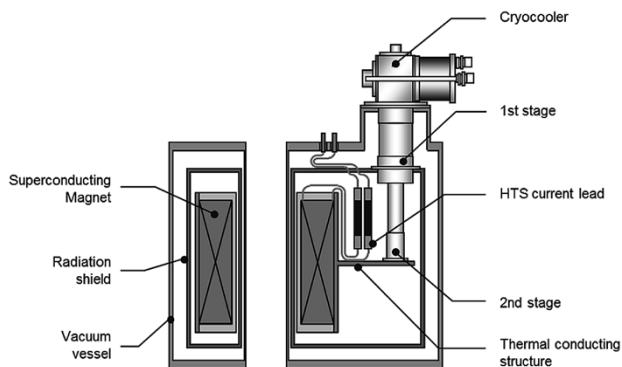


図10 無冷媒型マグネットの断面構造
Fig.10 Schematic of cross section of cryogen-free magnet

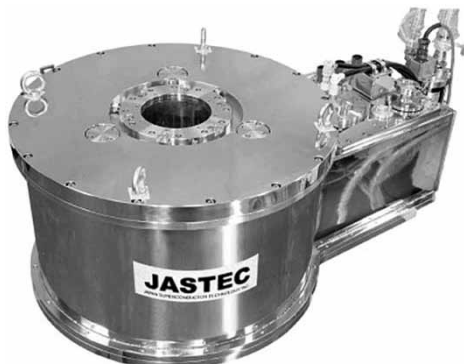


図11 ジャイロトロン用無冷媒マグネット
Fig.11 Photo of cryogen-free magnet for gyrotron application

トであり、無冷媒型を採用した超電導マグネットの一例である。

3.4 ゼロボイルオフ型および無冷媒型超電導マグネットの課題

前述のように、ヘリウム消費を節減するマグネットは既に一部用途で実用化に至っている。しかし、ゼロボイルオフ型であっても、液体ヘリウムを貯液する以上、製作時には一定量の液体ヘリウムを投入しなければならない。その必要貯液量は、装置の故障頻度と停止期間によって決まることから、装置の信頼性に依存するともいえる。

また、無冷媒型では、停電や冷凍機の定期保守の機会（通常1年ごと）に冷凍機を停止させる。冷却が途切れたマグネットは磁場を維持することができず、保守完了後に再通電が必要になる。MRIやNMR用途においては、マグネットへの通電のたびに、数日～数週間に及ぶ磁場の微調整作業が必要となる。継続的な運用を重視するこれらの用途においては、こうした保守時の稼働停止期間が長くなるのが無冷媒型の導入が進まない一因となっている。

このように、装置の信頼性および磁場クオリティの再現性などの周辺技術の開発・整備が、ゼロボイルオフ型や無冷媒型マグネットの利用拡大に向けた今後の課題である。

むすび=以上述べてきたように、ヘリウム資源が先細るなかで、超電導マグネットがヘリウム消費量の少ない形式に移行してゆくことは、いまや必然の流れである。

こうした動向に呼応してJASTECでは、ゼロボイルオフ型や無冷媒型マグネットの技術開発を進めてきた。JASTECが、超電導マグネットを継続的かつ安定的に供給できる体制と技術を将来にわたって整えていくことの重要性は、今後一層増していくものと考えられる。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本産業・医療ガス協会. ヘリウム生産・販売実績一覧表5年間(2010年～2014年). <http://www2.jimga.or.jp/dl/sangyo/all/statistics/regular/others/He5nen10-14.pdf>, (参照 2015-03-12).
- 2) Helium Statistics and Information, Mineral Commodity Summaries of United States Geological Survey. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf#search='helium+statistics+and+information%2C+mineral+2015'>, (参照 2015-03-12).
- 3) 上岡泰晴. 冷凍部会講演概要集. 2013, No.1-2.
- 4) Committee on Understanding the Impact of Selling the Helium Reserve, Selling the Nation's Helium Reserve. National Academic Press, 2010.
- 5) 渋谷和幸ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, No.3, p.82.
- 6) 広瀬量一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.27-31.