

COMPLETION AND OPERATION OF SUPERCONDUCTING MAGNET FOR THE 28 GHz ECR ION SOURCE

Jun-ichi Ohnishi, Takahide Nakagawa, Yoshihide Higurashi, Tuneaki Minato^{A)}

RIKEN Nishina Center

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{A)}Mitsubishi Electric Corporation

1-1-2 Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo, 652-8555

Abstract

The superconducting coils of the RIKEN 28 GHz ECR ion source achieved a full design performance in the second excitation test. In the first test, the sextupole coil quenched at approximately 85% of the design currents as reported last year. After that, the support structure at the ends of the sextupole coils was improved. After the second test, the cryostat for an ion source was assembled with the superconducting coils. The cryostat has three GM cryocoolers and liquid helium can be kept without re-pouring. The completed superconducting magnet and cryostat was delivered and installed at the 100 kV high voltage terminal up the RIKEN linac in December 2008. The cooling down and excitation test were done successfully, and research and development as an 18 GHz ECR ion source is being carried out. The first beam of Xe²⁰⁺ was sent and accelerated in the RIKEN linac in July 2009.

28 GHz ECRイオン源用超伝導磁石の完成と運転

1. はじめに

理研R I ビームファクトリーでは水素からウランまでのすべての元素について核子あたり345MeV以上にCW加速すること可能である。とくにウランビームは核分裂反応により新R I の生成断面積が大きいので、その強度を増加することは非常に重要であり、それを実現するため、28GHz ECRイオン源の開発が急ピッチで進められている。28GHz ECRイオン源は、共鳴磁場が約1Tであり、ミラー磁場は2~4T、6極磁場もプラズマチェンバー壁面（内半径75mm）において2T以上の磁場を必要とするため、ソレノイドと6極コイルに超伝導を使用する。図1に示すように28GHz ECRイオン源の超伝導コイルは6個のソレノイドコイルSL1~SL6の内側に6極コイルが置かれた構成で、6極コイルとソレノイドコイルの内径はそれぞれ197mmと340mmである。これらはCu安定化NbTi多芯線（裸線サイズ1.15 mm x 0.82mm）の密巻コイルで、一体化されて液体ヘリウムにより浸漬冷却される。コイル諸元の詳細は[1]に記述されている。

2. コイル支持構造の改造と励磁試験

既に報告しているように、超伝導コイルは2007年10月より三菱電機において製作を開始し、2008年6月に汎用クライオスタットを用いて、超伝導コイル単体の励磁試験を行なった^[2]。この一回目の励磁試験では、ソレノイドと6極コイルの両方を励磁した場合、6極コイルが85%~90%の電流値でクエンチした。図2に6極コイルのクエンチ電流値の履歴（2回目の励磁試験も含む）を示す。No.3~9ではソ

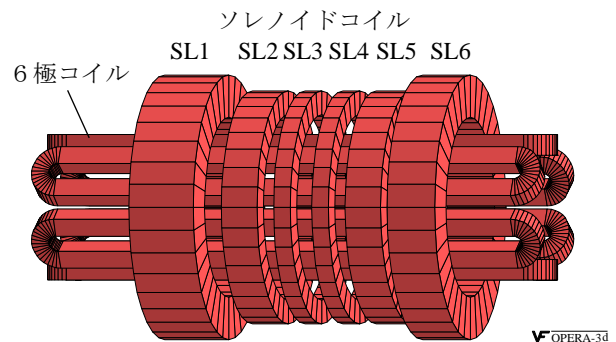


図1：超伝導コイルの配置

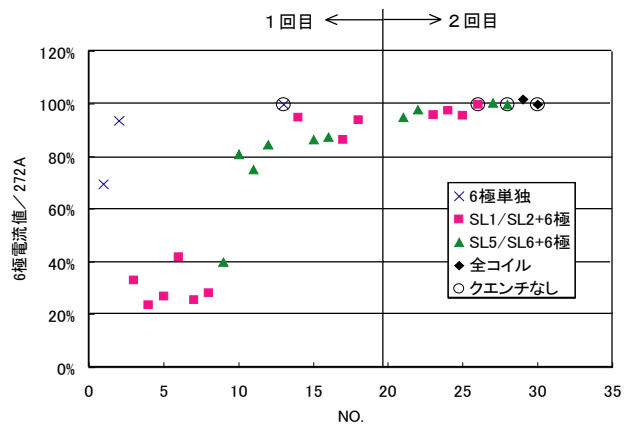


図2：6極コイルのクエンチ電流値

2回目は6極コイル支持構造改造後に実施。

レノイドコイル（または6極コイル）を先に励磁し

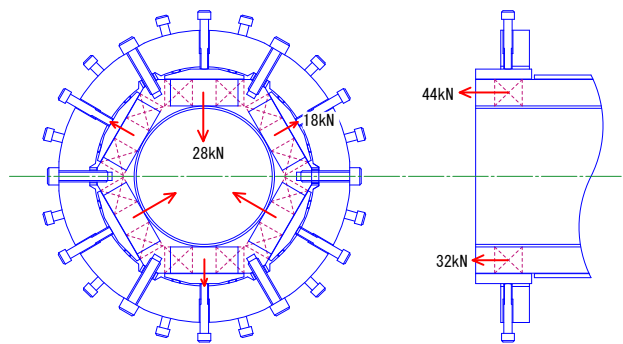


図3：6極コイル端部に働く電磁力と支持構造
SL1側とSL6側で電磁力が等しくなるように6極コイルの張り出し量を決めた。

その後、6極コイル（またはソレノイド）を励磁した場合で、設計電流値の約40%以下の電流値でクエンチを起こした。その後、No.10~12, 13~18ではソレノイドと6極の電流値の比を一定にして同時に励磁したもので、約85%程度までクエンチ電流値が向上したが、設計電流値には到達できなかった。クエンチは、SL1を励磁した場合とSL6を励磁した場合のどちらについても起きており、6極コイル端部で発生している可能性が高かった。また、クエンチ時の電圧波形から、コイルモーションの可能性があった。

6極コイル端部に働く電磁力を図3に示す。図3はソレノイドを励磁した場合であるが、励磁しない場合の径方向の電磁力は全コイル等しく内向きに約5kNである。このため、ソレノイドと6極コイルの電流値の比を保たずに励磁した場合、電磁力の方向が変化してコイルが動き易く、低い電流値でクエンチを起こしている可能性が高い。6極コイルは可能な限り長くして、ソレノイド磁場による電磁力の低減している。径方向の電磁力はSUS製のリングで支持する構造としているが、より剛性を増加させるため、リングを厚くするとともに、ヘリウム容器内筒を厚くして支持部材とする改造を行なった。改造後に実施した2回目の励磁試験（2008年10月）では、図2に示すように、数回のクエンチの後、設計電流値に到達した。

3. クライオスタット

2回目の励磁試験後、超伝導コイルとともにφ172mmの室温ボアを持つイオン源用クライオスタットが組立てられた。図4に外観写真、図5にクライオスタットの構成図を示す。超伝導コイルは液体ヘリウム約330 Lで浸漬冷却される。コイルへの電流供給は9本の高温超伝導体(HTS)電流リードを通して7台の直流電源で行なう。電流リードの破損やコイルのクエンチ保護のため、液体ヘリウム中にクランプダイオードが設置される。電磁ヨークは側面が50mm、RF入射側とビーム引出し側端面は80mmで断熱真空容器の一部を構成する。電流リードやその他の入熱は3台の住友重機械製GM冷凍機（RDK408S:2台、RDK408D2:1台）で冷却され、液



図4：完成した超伝導電磁石。レール上に設置されている。

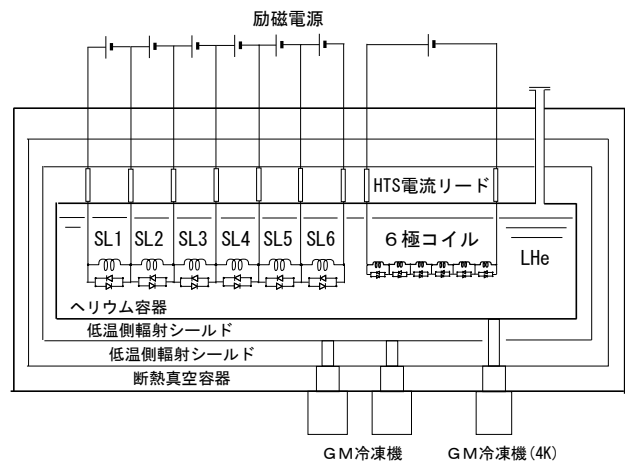


図5：クライオスタット構成図

表1：入熱量の計算値と冷凍能力(50Hz)

	ヘリウム容器	低温側輻射シールド	高温側輻射シールド
入熱量（計算値）	0.14W@4.2K	18W@40K	127W@70K
RDK408D2冷凍能力	1W@4.2K		43W@45K
RDK408S x 2台冷凍能力		18W@12K	86W@52K
温度（50%励磁時測定値）		18K	58K
He容器ヒーター熱量	0.6W		

体ヘリウムは、初期冷却時に注入した後は消費されない。GM冷凍機は2段の冷凍ステージをもっており、RDK408Sは高温側輻射シールドと低温側輻射シールドを冷却し、RDK408D2は高温側輻射シールドの冷却と液体ヘリウムの再凝縮に使用される。

表1に各温度ステージへの入熱量の計算値と冷凍能力から予想される冷凍ステージの温度及び実際の運転において平衡した温度を示す。液体ヘリウム温度の冷凍能力は入熱量を上まわっているため、ヒーターによりヘリウム容器圧力が負圧にならないように制御される。入熱量は設計値より少し大きい、ヘリウム温度で0.6W程度の余剰があり、運転上問題はなく良好である。

4. 据え付けと運転

2008年12月に完成した超伝導磁石（重量6トン）は理研重イオンリニアック（RILAC）の上流の高圧ステージ上に据付られた。U³⁵⁺イオンのRILACへの入射エネルギーは、127kV相当であるため、イオン源引き出し電圧を27kVとして、ステージ電圧は100kVとして設計した。高圧ステージ上に設置される主な機器は超伝導コイル励磁電源、GM冷凍機用ヘリウム圧縮機4台、18GHzRF電源2台、分析用90度偏向電磁石、ソレノイドコイル、真空排気装置、ビーム診断機器などで、全電力は約100kVAで絶縁トランスによって供給される。高圧ステージ付近の平面図を図6に示す。

超伝導コイル（重量760kg）の予冷はコイル内の熱応力を小さくするため、200Kまでは低温の窒素ガスにより冷却し、その後、液体窒素を注入した。使用した液体窒素は約1200 L、液体ヘリウムは約700Lであった。液体ヘリウムは3月に充填して以来、小型冷凍機で維持されている。

図7にイオン源運転に伴うヘリウム容器の圧力変化を示す。イオン源停止時の圧力は約800Pa、ヒーター出力は約0.6Wである。イオン源は18GHz運転のため、コイルは設計電流値の60%程度で運転され、励磁に約10分、減磁に約18分かかる。励磁減磁の間は渦電流損失により圧力上昇が見られる。また、プラズマを立てた場合は6 mm厚のSUSと0.4mm厚の銅を通過した制動X線によって、コールドマスが加熱される。800WのRF入力で、冷凍能力の余裕分(0.6W)を消費していることが分かる。2台の18GHz RF電源を使用すると最大3kWのRFパワーが入力さ

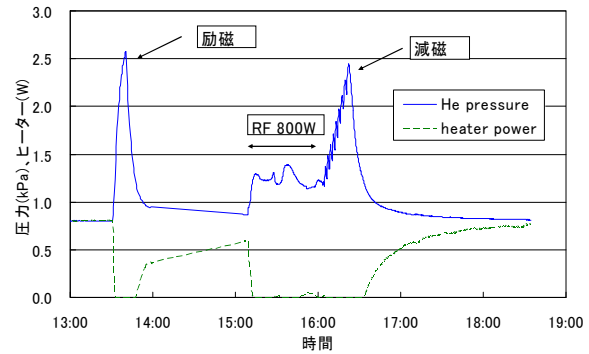


図7：ヘリウム容器の圧力変化とヒーター出力

れるので、プラズマチャンバーのまわりに2mm厚さのTa板を巻きつけて熱負荷を軽減する。さらに冷却能力が必要な場合は既に装備されている、GM-JT冷凍機（冷凍能力実測値：4W@4.2K）を使用する予定である。

5月に最初のプラズマが立って以来、イオン源としてR&Dが精力的に行なわれており^[3]、7月にはXe²⁰⁺のビームがリニアックに供給され加速に成功した^[4]。

参考文献

- [1] J. Ohnishi et al., Proc. EPAC08, p. 433(2008).
- [2] J. Ohnishi et al., 第5回加速器学会年会, p. 406(2008).
- [3] Y. Higurashi et al., in these proceedings.
- [4] Y. Sato et al., in these proceedings.

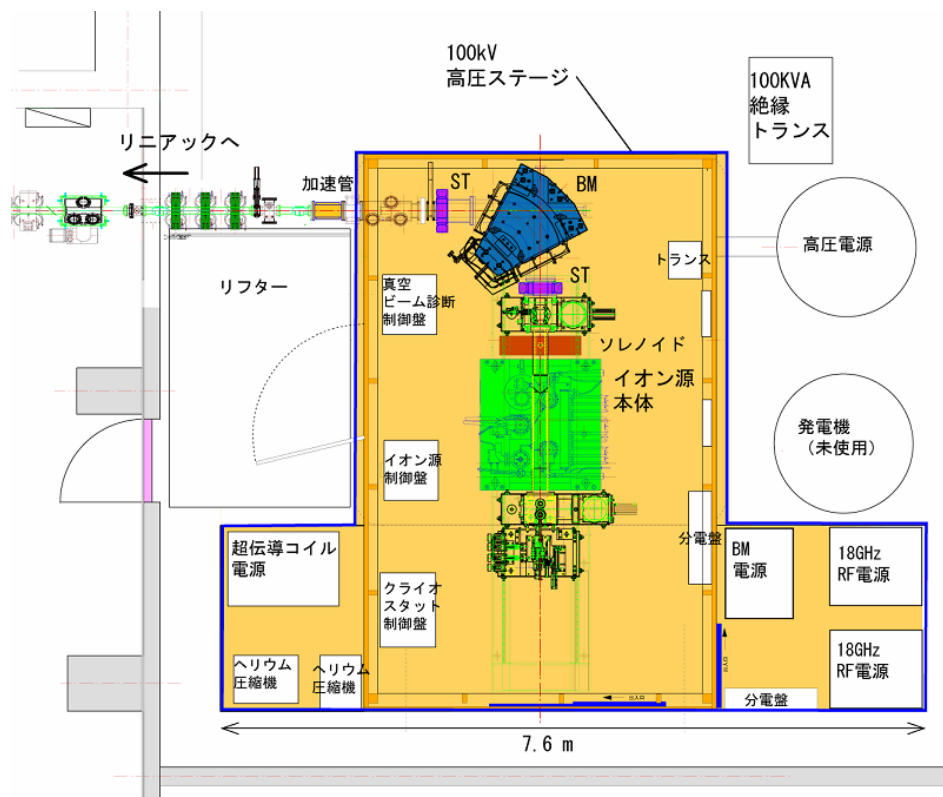


図6：100kV高圧ステージ付近平面図