

# CONSTRUCTION AND EXCITATION TESTS OF SUPERCONDUCTING COILS FOR THE 28 GHz ECR ION SOURCE

Jun-ichi Ohnishi, Takahide Nakagawa, Tuneaki Minato<sup>A)</sup>, Hiroki Okuno, Yoshihide Higurashi,  
Kensuke Kusaka, Akira Goto  
RIKEN Nishina Center  
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198  
<sup>A)</sup>Mitsubishi Electric Corporation  
1-1-2 Wadamisaki-cho, Hyogo-ku, Kobe, Hyogo, 652-8555

## Abstract

A superconducting coil assembly for a 28 GHz ECR ion source at the RIKEN RI beam factory was constructed and its excitation tests were carried out. The coil assembly consists of a set of sextupole coils and six solenoids to generate a confinement magnetic field. All the coils use a NbTi conductor and are bath-cooled in liquid helium. The maximum magnetic field on the coils is 7.4 T. The characteristic feature of this coil system is that the six solenoids can generate a flat region in the axial confinement magnetic field. A large radial magnetic field due to this solenoid configuration is accordingly provided on the sextupole coils, and an inhomogeneous, strong expansion force is generated on the sextupole coils; this makes the design and fabrication of the sextupole coil assembly difficult. The coil winding began at a factory of Mitsubishi Electric Corporation in January 2008. After all the coils were wound and assembled, the excitation tests were performed in June 2008.

## 28 GHz ECRイオン源用超伝導コイルの製作と励磁試験

### 1. はじめに

理研RI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イオンについて核子あたり345MeVまでのCW加速が可能である。とくにウランビームは核分裂反応により新しいRIが多数生成されるため、ビーム量の増強が緊急の課題となっている。イオン源において $U^{35+}$ イオンの生成が必要であるが、現在の18GHz ECRイオン源では収量が少ないため、28GHz ECRイオン源の導入が決定された<sup>[1]</sup>。28GHz ECRイオン源は、共鳴磁場は約1Tであり、ミラー磁場は2~4T、横方向の閉じ込め用6極磁場もプラズマチャンバー壁面において2T以上の磁場を必要とするため、ソレノイドコイルと6極コイルは超伝導コイルを使用する。超伝導コイルは三菱電機において2008年1月より巻線を開始し、6月に全コイルの組立を終え励磁試験を実施した。

### 2. コイル配置と諸元

図1に28GHz ECRイオン源の超伝導コイルの配置を示す。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。図2に中心軸上のソレノイド磁場 $B_z$ と室温ボア(R=85.5mm)に置かれたプラズマチャンバーの内壁面上(R=75mm)の6極磁場 $B_y$ を示す。SL1~SL6コイルは個別電源で励磁する。SL2とSL5はミラー

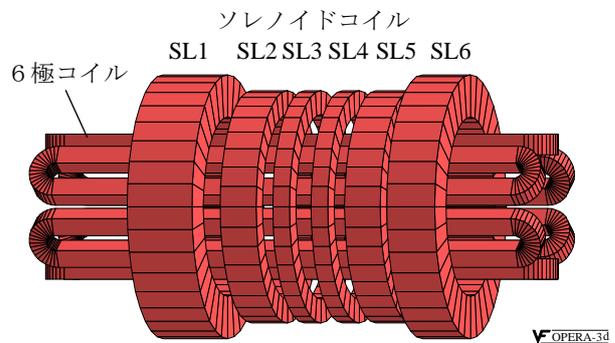


図1：超伝導コイルの配置

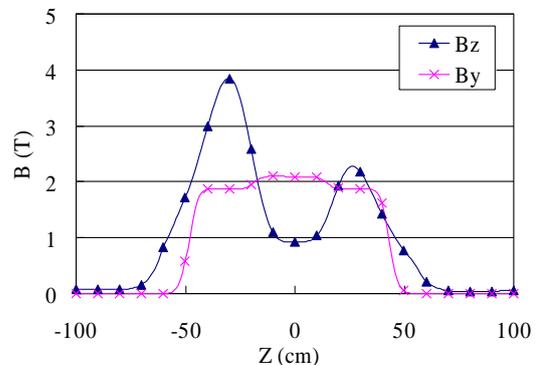


図2：磁場分布

$B_z$  は中心軸上のソレノイド磁場、 $B_y$  はプラズマチャンバー表面 ( $r=75\text{mm}$ ) における6極磁場を示す。

表 1 : 超伝導コイルの諸元

	SL 1	SL 2	SL 3	SL 4	SL 5	SL 6	6極コイル
内半径 (mm)	170	175	175	175	175	170	102
外半径 (mm)	250	220	220	220	220	250	142
長さ (mm)	135	75	35	35	75	100	1073
導体サイズ (mm)	0.82 x 1.15	0.82 x 1.15	φ1.09	φ1.09	0.82 x 1.15	0.82 x 1.15	0.82 x 1.15
銅比	1.3	1.3	6.5	6.5	1.3	1.3	1.3
ターン数	9124	2778	1305	1305	2778	6830	1216
電流 (A)	162	182	109	109	155	132	271
Bmax (T)	7.2	5.2	3.1	3.0	4.8	5.4	7.4 (6.5)
Ic (A)	203	298	229	233	278	223	349
Iop/Ic	0.80	0.61	0.47	0.47	0.56	0.59	0.78
インダクタンス(H)	34.0	4.0	1.0	1.0	4.0	20.0	6.9

磁場を作っているSL1、SL6とは逆極性であり、中央部の磁場平坦部を生成することができる。SL3とSL4は微調整用で極性変更可能である。一方、動径方向の閉じ込め磁場は6極コイルで生成し、プラズマチャンバーの内壁面(R=75mm)で2T以上とすることができる。図から分かるように、6極コイル中央部に鉄の磁極(長さ330mm)を使用し、10%程度磁場を増加させている。6極コイルの最大経験磁場はSL1中心付近の外半径側で与えられるので、その部分には鉄磁極は用いない。また、6極コイル端部の動径方向の電磁力を緩和するため、コイルを長くしてソレノイド磁場の影響を小さくしている。

表 1 にコイルの諸元を示す。超伝導線はCu安定化NbTi多芯線を使用する。SL3とSL4は銅比6.5、φ1.09mmの丸型超伝導線、他のコイルは銅比1.3、0.89mm x 1.25mmの平角超伝導線を使用する。当初、6極コイルは内接半径102mmの円筒に沿った鞍型で設計していたが<sup>[2]</sup>、コイル巻線を容易にするためフラットなレーストラックコイルに変更した。この変更による磁場の減少を補うため、断熱真空部の寸法を削ってコイルの内接半径を98.5mmとした。ソレノイドコイルの最大経験磁場は7.2T、6極コイルは7.4T(線材と直角成分は6.5T)であり、臨界電流に対する負荷率は80%を超える。

### 3. 6極コイルに働く電磁力と支持構造

図 3 に6極コイル直線部に働く電磁力を示す。Frは動径方向、Ftはコイル直線部の拡張力を表す。拡張力Ftは自己磁場だけではなくソレノイドコイルの作る動径方向の磁場成分にもよるため、ビーム(Z)方向の位置によって電磁力が大きく変化する。また、6極コイルの極性によっても異なる。これらの電磁力に対してコイルを強固に固定するため、6極コイル直線部は図 4 に示す断面構造を採用した。コイルに鉄磁極とステンレス製スペーサーを挿入した後、三角形断面のチタン製スペーサーと共に組立て、その周りにφ0.65mmのステンレスワイヤーを580MPaの高張力で4層巻く構造とした。とくにSL1とSL2の間(図 3 のZ=-20cm付近)はコイルの拡張力が極性によって大きく異なるので(図 4 に電磁力の値を示す)、外半径250mm、厚さ30mmのステンレスの円盤でコイルを支持することによりコイル変形を抑

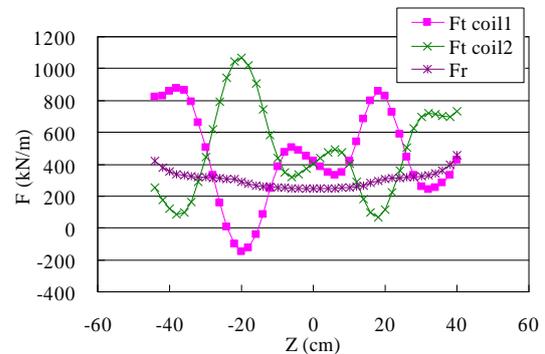


図 3 : 6極コイル直線部に働く電磁力  
Fr は動径方向の電磁力、Ft はコイルの拡張力を示す。coil1 と coil2 は極性が異なる。

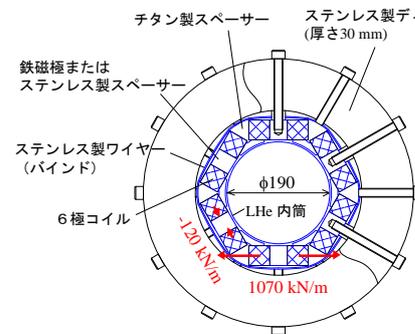


図 4 : 6極コイル直線部の断面構造  
補強用のステンレス製ディスクは SL1 と SL2 の間に設置される。

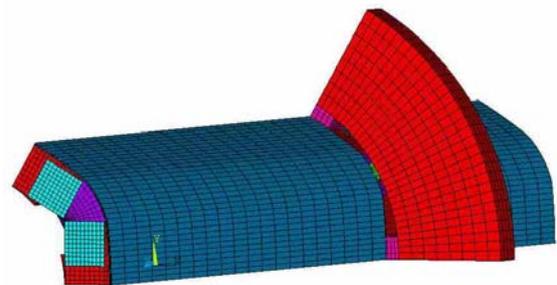


図 5 : 6極コイル直線部の構造計算(ANSYS)用モデル

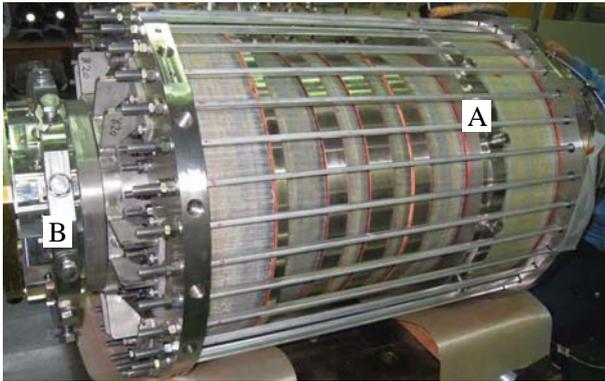


図6：組立完了後のコイルスタック

(A)は6極コイル補強用のステンレス板を示す。  
(B)は6極コイル端部の動径方向の電磁力を支持するリングを示す。

制する。コイルの変形と応力を計算するため、ANSYS<sup>[3]</sup>を用いた。図5に6極コイル直線部のモデルを示す。コイルは線材方向の弾性率を97GPa、横方向を16GPaとして直交異方性材料として扱った。冷却後のコイルの熱収縮量を0.5%とすると、バインドの張力は25%程度減少する。コイルはバインドの張力と冷却時の熱収縮のため0.16mm内周側に変位する。さらに励磁したときの変位量は0.03mm、コイル内のせん断応力は最大7MPaと許容できる数値であった。

#### 4. コイルの製作

6極コイルは巻き線後、エポキシ真空含浸により製作した。エポキシのコイル内部への浸透は試巻きコイルを切断して確認したところ極めて良好であった。一方、ソレノイドコイルは塗り巻きにより製作した。これは主にソレノイドコイルの方が巻き線作業が容易であることによる。図6に組立後のコイルスタックを示す。6極コイルの端部に働く動径方向の電磁力はステンレス製のリングによって支持する。6個のソレノイドコイルはコイル間に働く約80kNの反発力を支持するため、その内側と外側、計64本のアルミ合金製のタイロッドで締め付けた。ここでは示さないが、6極端部とソレノイドについてもANSYSによる3次元構造計算を行い、設計寸法を決定した。

#### 5. 励磁試験

6極コイルとソレノイドコイルを組立てた後、汎用クライオスタットを用いて励磁試験を行った。各ソレノイドコイルはクエンチせずに設計電流値に到達した。6極コイルの励磁結果を表2に示す。6極コイルは単独の励磁では2回のクエンチの後(run#1, #2)、設計電流値に到達した(run#13)が、ソレノイドと6極コイルを同時に励磁した場合、いずれの場合も6極コイルが設計より低い電流値でクエンチした。ソレノイドコイルSL1、SL2を励磁した状態で6極

表2：6極コイル励磁試験結果

6極コイルにクエンチが発生したときの電流値(A)

run #	sextupole	SL1	SL2	SL5	SL6
design	272	162	182	155	132
1	189				
2	255				
3	90	136	183		
4	65	136	183		
5	73	136	183		
6	114	136	183		
7	70	136	183		
8	77	136			
9	109				132
10	220				92
11	204			155	132
12	230			132	112
13(NQ)	272				
14	258	146	164		
15	234			135	114
16	238			136	116
17	235	127	143		
18	256	137	154		

コイルを励磁した場合、65A(24%)から115A(42%)の低い電流値でクエンチした(run#3~#7)。SL5、SL6を先に励磁した場合も同様であった(run#9, #11)。これらにおいてはクエンチ直前にコイルモーションと思われる電圧波形が観測された。また、run#10は先に6極コイルを220Aで励磁した状態でSL6を励磁した。run#12とrun#14~#17ではソレノイドコイルと6極コイルの電流値の比を一定にして同時に励磁したもので、6極コイルのクエンチ電流が設計値の85%以上に向上した。これは、電流ランプ中に電磁力の方向が変化しないことによるものと思われる。クエンチの理由は明らかではないが、コイル端部のワイヤーモーションなどが疑われるため、その部分の支持を強化して再試験を行なう予定である。

#### 6. おわりに

28GHz ECRイオン源用超伝導コイルの製作を行い励磁試験を実施した。この超伝導コイルは6極とソレノイドの複合コイルであり、6極コイルはソレノイドコイル磁場により複雑な電磁力が作用する。このため、ANSYSを用いた3次元構造計算を精密に行ってコイルの固定構造を設計した。励磁試験ではソレノイドコイルと6極コイルを同時に励磁した場合、6極コイルが設計値の85%~94%でクエンチした。今後、6極端部の固定構造を強化し再試験を実施する予定である。

#### 参考文献

- [1] T. Nakagawa et al., Rev. Sci. Instr. 79 (2008), 02A327.
- [2] J.Ohnishi et al., "ECRイオン源用超伝導コイルの設計", Proc. the 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Wako, Aug. 1-3, 2007.
- [3] <http://ansys.com>.