

DESIGN OF SUPERCONDUCTING COILS FOR AN ECR ION SOURCE

Jun-ichi Ohnishi, Takahide Nakgawa, Hidehiro Higurashi, Masanori Kidera, and Akira Goto

RIKEN Nishina Center

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama, 351-0098

Abstract

The superconducting coils for a 28 GHz ECR ion source have been designed. They consists of six solenoids and a set of sextupole excited individually. The peaks of the mirror magnetic field are 3.8 T and 2.2 T in the rf injection and the beam extraction sides, respectively. Conductors of 0.92 mm x 1.25 mm and ϕ 1.15 NbTi/Cu are used. The magnetic force acting on the cold mass was calculated to be 100 kN maximum. In the quench simulation, the maximum induced voltage of the sextupole is 1100 V and the maximum temperature rises are 110 K and 84 K in the sextupole and the solenoids, respectively.

ECRイオン源用超伝導コイルの設計

1. はじめに

RIビームファクトリー^[1]では昨年3台のサイクロトロンのコミッションングが行なわれ、今年3月に核子あたり345MeVのウランビームの加速に成功した。5月にはこのウランビームにより最初の新同位元素が同定されている。イオン源におけるウランビーム U^{35+} の強度は2000enAであるが、2回の荷電変換とリニアックと4台のサイクロトロンにおけるビーム通過効率により最下流で得られる345MeV/uのウランビーム U^{86+} の強度は2~4enAまで減少する。このため、ビーム強度を増加させることが緊急の課題である。最近、ECRイオン源のマイクロ波の周波数を18GHzから28GHzに増加することにより、 U^{35+} など高い電荷数のビーム強度が著しく増加することが、LBLなど他研究所において報告されているため^[2]、我々は28GHzに対応した超伝導ECRイオン源の早期の導入を目指し、基本設計を行なった。

2. 超伝導コイルの配置と磁場

図1に28GHzECR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204mm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(ϕ 174)に置かれたプラズマチェンバーの内壁上(内半径75mm)の径方向の6極磁場 B_y を示す。マイクロ波導入側の最大磁場は3.8Tで、ビーム引き出し側は2.2Tである。28GHzのマイクロ波に対するECR磁場は1Tである。SL1~SL6は個別電源で独立に励磁をできる。SL2とSL5はミラー磁場を作っているSL1、SL6とは逆極性になっており、磁場の平坦部を軸方向に広くしている。

一方、径方向の磁場は6極コイルで生成し、プラ

ズマチェンバー内壁面で磁場強度が2T以上となるように設計した。図から分かるように中心部は6極コイルに鉄の磁極(長さ340mm)を使用することにより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中心付近の外径側で与えられるので、その部分には鉄磁極は用いない。6極コイルの端部はワイヤーモーションが起きやすいため、コ

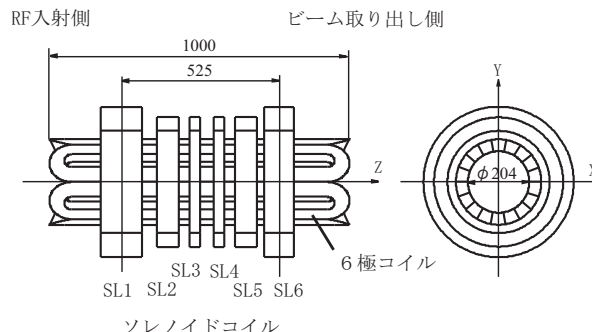


図1：超伝導コイルの配置

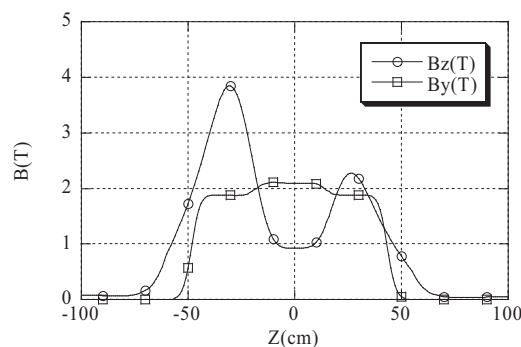


図2： B_z は中心軸上のソレノイド磁場、 B_y はプラズマチェンバー表面($x=75$ mm)における6極磁場の分布を示す。

表 1 : 超伝導コイルの諸元

| | SL 1 | SL 2 | SL 3 | SL 4 | SL 5 | SL 6 | Sextupole |
|---------------------------------|-------|------|------|------|------|-------|-----------|
| 内半径(mm) | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | 102 |
| 外半径(mm) | 250 | 215 | 215 | 215 | 215 | 250 | 142 |
| 幅/長さ(mm) | 135 | 75 | 35 | 35 | 75 | 100 | 961 |
| ターン数 | 108 | 60 | 30 | 30 | 60 | 80 | 31 |
| 層数 | 87 | 49 | 45 | 45 | 49 | 87 | 42 |
| 最大平均電流密度(A/mm ²) | 135 | 150 | 90 | 90 | 127 | 115 | 190 |
| 電流値I _{op} (A) | 155 | 172 | 105 | 105 | 146 | 132 | 248 |
| B _{max} (通常)(T) | 7.2 | 5.2 | 3.3 | 3.2 | 4.8 | 5.5 | 6.9 |
| I _c (A) | 195 | 278 | 213 | 218 | 252 | 216 | 307 |
| I _{op} /I _c | 0.79 | 0.62 | 0.49 | 0.48 | 0.58 | 0.61 | 0.81 |
| インダクタンス(H) | 38.80 | 4.47 | 1.15 | 1.15 | 4.45 | 23.56 | 6.45 |

表 2 : 超伝導線材の諸元

| | ソレノイド1, 2, 5, 6 6極コイル | ソレノイド3, 4 |
|----------------------------|--------------------------|-----------|
| 裸線寸法 (mm) | 1.15 x 0.82 | Φ1.09 |
| 絶縁後寸法 (mm) | 1.25 x 0.92 | Φ1.15 |
| 銅比 | 1.3 | 6.5 |
| RRR | > 100 | > 100 |
| フィラメント径 (μm) | 40 | 80 |
| I _c (A) at 4.2K | | |
| 5T | > 1050 | > 340 |
| 6T | > 840 | |
| 7T | > 620 | |

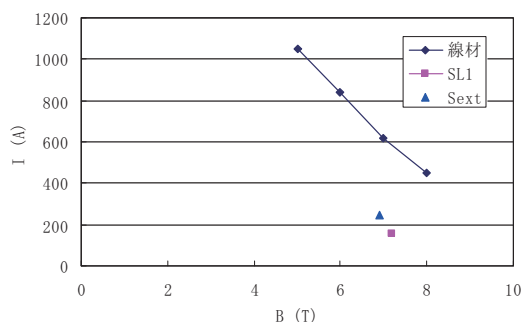


図 3 : ロードライン

イル長を長い目にしてソレノイド磁場の影響を小さくしている。

表 1 にコイルのパラメーターを示す。超伝導コイルの最大経験磁場はソレノイドコイルSL1で7.2T、6極コイルは6.9Tである。I_cに対する負荷率は両コイルとも80%程度である。磁場計算には"poisson"と"Opera3d"を使用した。

超伝導線の諸元を表 2 に示す。超伝導線はCu安定化NbTi多芯ケーブルを使用する。SL3とSL4はΦ1.09mmの丸型線、その他のコイルは0.89 mm x 1.25mmの平角線を使用する。表 1 に線材の仕様を示す。小型冷凍機への熱負荷を抑制するため、細い超伝導線を用いコイル電流値を小さくしている。6極コイルとソレノイド1は経験磁場が高いので、平角線は低銅比(1.3)の線材を使用する。

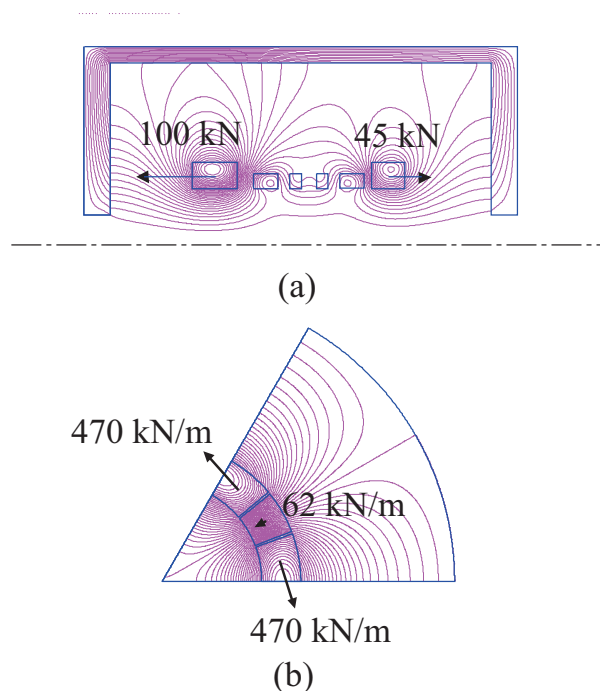


図 4 : コイルに働く電磁力

3. 電磁力

図 4 にソレノイドコイルと6極コイルに働く電磁力を示す。計算には2次元コード"poisson"を使用した。(a)はソレノイドコイル(SL1, SL6)と電磁ヨーク(50mm/80mm厚)間に働く力を示す。コールドマス全体に働く力は、SL1を単独励磁した場合が最大になり、100kNである。全コイルを定格励磁した場合は、コイルSL2~SL5とヨーク間に働く力は小さいので、SL1とSL6に働く力が相殺し、RF入射側に約55kNの力を受ける。

(b)は6極コイル断面に働く力を示す。コイルの拡張力は1/2コイルあたり65kN/m(平均0.87MPa)、周方向に働くコイルの最大面圧は12MPaである。6極コイルはカラーまたはワイヤーなどで固定する必要があるが、構造はまだ検討できていない。

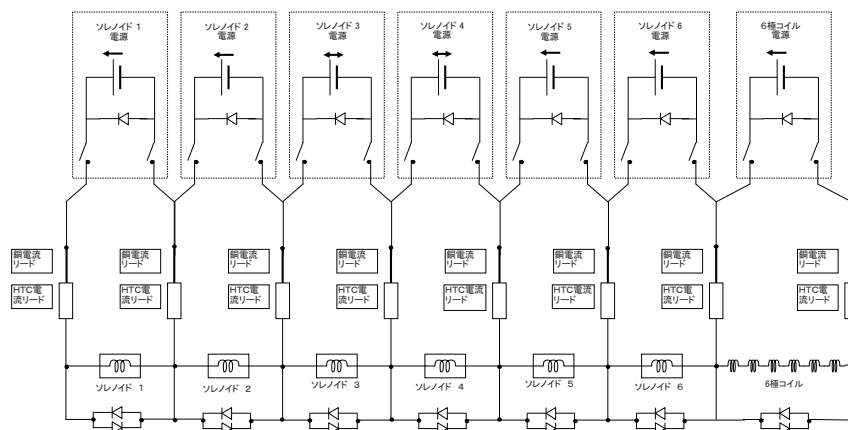
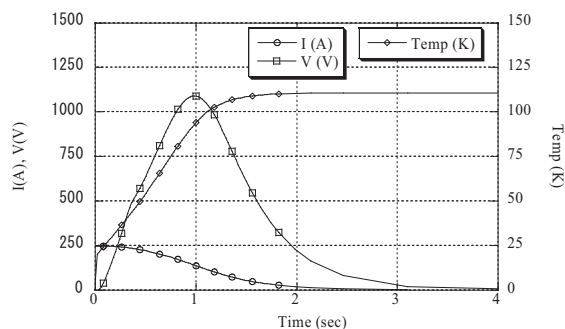
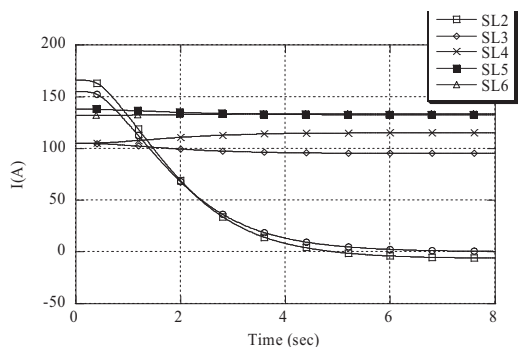


図 5 : コイルと電源の接続



(a)



(b)

図 6 : クエンチ時の電流電圧波形と温度 (計算)

4. クエンチ保護

図 5 にコイルと電源の接続図を示す。各コイルは個別の 7 台の電源で励磁する。液体ヘリウムを小型冷凍機によって凝縮運転するため、計 8 本の高温超伝導体 (HTC) 電流リードと銅製電流リードを直列で用い、隣り合ったコイルで共用する。

いずれかのコイルにクエンチが発生した場合は全

電源を停止し、電源側ダイオードに還流させる。一方、HTC電流リードの温度または電圧に異常があった場合は、遮断器を開き、液体ヘリウム内のダイオードに電流を還流させ、蓄積エネルギーを消費させる。

図 6 (a) に 6 極コイルがクエンチした場合のコイル電圧と温度上昇の計算結果を示す。計算コード“QUENCH”を使用した。定格電流 248A において 6 コイルのうち 1 コイルだけがクエンチした場合で、クエンチしたコイルの両端電圧は最大 1100V、コイル温度は 110 K となった。コイルの設計によって電圧がこれより高くなる場合は、6 コイルをいくつか分割してクランプする、あるいはヒーターによって強制クエンチさせる、などの検討が必要である。

図 6 (b) に 6 個のソレノイドコイルが定格電流値で励磁されているときに SL1 がクエンチした場合の電流波形を示す。他のコイルはクエンチしないと仮定した。SL2 の電流値が減少しているのは、SL1 と電流の方向が反対のためである。SL4 は電流値の増加が見られるが、 I_c より十分低く問題のない量である。この時の SL1 の温度は 79K となった。

5. おわりに

今年度、ここに示した基本設計をもとに超伝導コイルとクライオスタットの構造設計および製作を行い、2008 年夏には完成の予定である。なお、本イオン源全体については [3] に述べられている。

参考文献

- [1] Y. Yano, “The RIKEN RI Beam Factory Project: A status report”, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **261** (2007) 1009-1013.
- [2] D. Leitner et al. “Status report of the 28 GHz superconducting electron cyclotron resonance ion source VENUS”, Rev. Sci. Instr. **77** (2006) 03A302.
- [3] T. Nakagawa et al., “SC-ECRIS for RIKEN RI beam factory project”, these proceedings.