

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム(6-1) —ビーム最終収束システムの建設状況—

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (6-1) —Construction Status of the Beam Final Focus System—

大内徳人, 有本靖, 岩崎昌子, 王旭東, 川井正徳, 近藤良也, 宗占国, 土屋清澄, 東憲男, 山岡広(KEK/総研大); 村井隆, 高木繁之, 河野宏(三菱電機); 田中学(三菱電機システムサービス); 遠藤友成(日立プラントメカニクス); WANDERER Peter, PARKER Brett, ANERELLA Michael, MARONE Andy, JAIN Animesh (BNL)

OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, IWASAKI Masako, WANG Xudong, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo, TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, YAMAOKA Hiroshi (KEK/Sokendai); MURAI Takashi, TAKAGI Shigeyuki, KONO Hiroshi (Mitsubishi Electric Corp.); TANAKA Manabu (Mitsubishi Electric System Service); ENDOHU Tomonari (Hitachi Plant Mechanics); WANDERER Peter, PARKER Brett, ANERELLA Michael, MARONE Andy, JAIN Animesh (BNL)

E-mail: norihito.ohuchi@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子ビーム衝突型加速器 KEKB のアップグレード(SuperKEKB)を2010年から行っている。SuperKEKB では、KEKB 加速器が記録した世界最高の電子・陽電子衝突性能(ルミノシティー)を40倍まで高めることを最大の課題としている。この為、ビーム最終収束システムは、この加速器の最も重要な機器であり、また非常に繊細なビーム運転を可能にする為にシステムは多くの超伝導電磁石から構成されている。本報告では、この超伝導電磁石システムの建設状況の概要について報告する。

2. SuperKEKB ビーム最終収束システム

ビーム最終収束系は、8 台の超伝導 4 極電磁石から構成され、ビーム運転調整用には 43 台の超伝導補正多極電磁石が使用される。又、素粒子検出器 Belle-II 超伝導ソレノイドが発生する 1.5T のソレノイド磁場のビーム運転への影響をキャンセルする為に 4 台の超伝導ソレノイドが組込まれる。これらの超伝導電磁石は、ビーム衝突点(IP)の左右に 2 台のクライオスタットに組込まれる。磁石の構成を図 1 に示した。

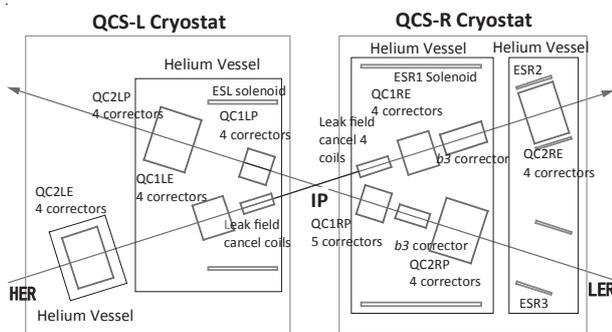


Fig. 1 SuperKEKB final focus system

3. 超伝導 4 極電磁石(QC1, QC2)

ビーム最終収束用超伝導 4 極電磁石については、磁石設計・プロトタイプの開発・実機の製作を本学会にて報告してきた[1,2]。8 台の 4 極電磁石の内、IP 左側クライオスタットに組込まれる 4 台については、4K での励磁試験・磁場測定を完了し、現在クライオスタットへ組込むための準備を行っている。4 台の 4 極電磁石の励磁試験及び磁場測定結果については、本学会プログラム番号 3C-a02 にて詳細を報告する。

4. 超伝導補正多極電磁石

43 台の超伝導補正多極電磁石は米国 Brookhaven 国立研究所(BNL)との共同研究協力で製作を進めている[3]。超伝導補正多極電磁石は、ヘリウム容器内筒表面に直接超伝

導線を巻付ける方法(Direct Winding Method)で製作される。使用されている超伝導線は、線径 0.35mm、銅比1の NbTi 線を使用している。製作される補正電磁石のタイプは、2 極磁石 16 台、4 極磁石 8 台、6 極磁石 8 台、8 極磁石 7 台、10 極磁石 2 台、12 極磁石 2 台である。この内、30 台の磁石は主 4 極電磁石のボア内に設置される。この超伝導補正多極電磁石についても IP 左側で使用されるものは製作が完了し、4K での性能も確認されている。

5. 超伝導ソレノイド(ESL,ESR)

ビーム最終収束システムは、素粒子検出器 Belle-II の超伝導ソレノイドが発生する 1.5T の磁場中で運転される。この磁場は交差角 83mrad を持つビームの衝突性能を著しく劣化させる為、ビームライン上でのソレノイド磁場を積分値としてゼロにする必要がある。ESL と ESR は Belle-II ソレノイド磁場に対して反対方向の磁場を発生し、IP からのソレノイド磁場の積分値をゼロに調節する。現在、ESL と ESR の磁場設計は完了し、ESL の製作を行っている。ESL ソレノイド磁石のクエンチ解析については、本学会プログラム番号 3C-a03 にて報告する。

6. 冷却システム及びモニター・インターロックシステム

超伝導電磁石・クライオスタットの冷却には、其々単独のヘリウム冷凍機システムが使用される。ヘリウム冷凍機は、KEK-TRISTAN 加速器用に建設され、1 台は KEKB 加速器超伝導電磁石冷却に使用されたものである。冷凍機システムは 250W@4.3K の冷凍能力を持ち、20g/s の過冷却液体ヘリウム(4.35K, 0.16MPa)を作ることが出来る熱交換システムが付属されている。

冷却システムの状況は、SuperKEKB 加速器運転状況監視システムに取り込まれ、加速器の運転に利用される。又、本モニターシステムは超伝導電磁石クエンチ時のビームアポート処理にも利用される。

冷却システム及びモニター・インターロックシステムは、本学会プログラム番号 3C-a04, a05 にて報告する。

7. まとめ

ビーム最終収束用超伝導電磁石システムは、2 台のクライオスタットに組込まれる。IP 左側用クライオスタットは来年 3 月に完成し、ビームラインに据付ける前に性能確認の為に単体の冷却試験が行われる。

参考文献

1. Y. Arimoto, et al.: CSJ Conference, Vol. 86 (2012) p.121
2. Y. Arimoto, et al.: CSJ Conference, Vol. 89 (2013) p.167
3. B. Parker, et al.: Proc. of NA-PAC'13, Pasadena, September 2013, pp. 1241-1243

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの開発(6-2) —超伝導4極電磁石の製作・低温試験結果(第1報)—

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (6-2) - Construction and cold tests of the superconducting quadrupole magnets (first report) -

有本靖、王旭東、岩崎昌子、川井正徳、近藤良也、宗占国、土屋清澄、東憲男、山岡広、
大内徳人(KEK/総研大); 田中学(三菱電機システムサービス); 遠藤友成(日立プラントメカニクス);
村井隆、高木繁行、河野裕史(三菱電機);

ARIMOTO Yasushi, WANG Xudong, IWASAKI Masako, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,
TSUCHIYA Kiyosumi, HIGASHI Norio, YAMAOKA Hiroshi, OHUCHI Norihito (KEK/SOKENDAI);
TANAKA Manabu (Mitsubishi Electric System Service); ENDOU Tomonari (Hitachi Plant Mechanics);
MURAI Takashi, TAKAGI Shigeyuki, KONO Hiroshi (Mitsubishi Electric)
E-mail: yasushi.arimoto@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構では、電子・陽電子衝突型加速器(KEKB)のルミノシティを40倍($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)に高めたSuperKEKBを建設している[1]。SuperKEKBではビーム衝突点(IP)において鉛直方向のビームサイズは約50nmまで収束される。このためのビーム収束システムはIPをはさんで8台の超伝導4極電磁石で構成される。我々はリング中心より見てIPの左側に設置されるQCS(QCS-L)の製作を先行して進めている。前回の発表会において、室温磁場測定によりこれらの4極電磁石のエラー6極磁場が4極磁場の大きさに対し、 1×10^{-3} 以下の許容値内であったことを報告した[2]。今回はこれらの電磁石の低温試験を行なったので報告する。

2. QCS-L 電磁石諸元

QCS-Lには電子ビームリング上にIPより近い順にQC1LE, QC2LEと呼ばれる4極電磁石が設置される。また陽電子ビームリング上にはQC1LP, QC2LPと呼ばれる電磁石が設置される。各4極電磁石のパラメータを表1に示す。磁束密度の増強と磁気遮蔽のためにQC1LE, QC2LPにはパーメンジュールヨークが、QC2LEには鉄ヨークがカラー外周部に組み込まれている。

Table 1. Main parameters of the quadrupole magnets on QCS-L. Here, I.D. and O.D. are inner and outer diameter of the coil conductor and r_0 , L_{eff} , G , and I_D are a reference radius, effective length, field gradient, and rated excitation current, respectively.

	QC1LP	QC1LE	QC2LP	QC2LE
I.D. [mm]	25.0	33.0	53.8	59.3
O.D. [mm]	35.5	70.0	93.0	115.0
r_0 [mm]	10	15	30	35
L_{eff} [m]	0.334	0.373	0.410	0.537
G [T/m]	76.4	91.6	32.0	36.4
I_D [kA]	1.8	2.0	1.0	1.25
Yoke	-	Permendur	Permendur	Iron

3. 低温試験

低温試験は図1に示す縦型クライオスタットを用いて行なった。電磁石はクライオスタットのトップフランジより釣り下げられて内径 $\phi 500$ mm、深さ2000mmのヘリウム槽内に設置される。ヘリウム槽外壁は真空層と液体窒素層によって断熱されている。クライオスタット中心には真空断熱を施した二重管が挿入され、二重管の中にハーモニックコイルが挿入される。QC1LE/LPの測定には $\phi 12$ mm、QC2LE/LPには $\phi 20$ mmのハーモニックコイルを用いた。各々のハーモニックコイルにはプロファイル測定用の長さ20mmのハーモニックコイルと積分磁場測定用の長さ600mmのハーモニックコイルが組み込まれている[3]。

低温試験ではQCS-Lすべての電磁石について、定格電流における電源遮断試験、電流ループ測定、軸方向のプロファイル測定を行なった。

4. 測定結果

すべての電磁石について、定格電流までクエンチなしで励磁することが出来た。また4極電磁石QC1LP及びQC1LEの積分磁場の多極成分、 b_n, a_n の測定値を図2に示す。ここで多極成分は以下の式で定義され、単位はUnitと呼ぶ。

$$B_y + iB_x = B_2 10^{-4} \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left(\frac{x + iy}{r_0} \right)^{n-1} \quad (1)$$

ここで B_x, B_y は直交座標系で表わされる磁束密度、 b_n, a_n は $2n$ 極の参照半径 r_0 における、normalとskew成分である。

この結果を見ると6極($n=2$)成分が最も大きな値となっているが、これはコイル断面形状における $25\mu\text{m}$ 程度のDipole変形によるものと考えられる。しかし、どちらのコイルもすべての多極磁場成分は10Unit以下となっており、これはビーム光学から要求される仕様を満足している。ここではQC1LP/LEのみの結果を示したが、発表会ではQC2LP/LEの結果についても報告する。

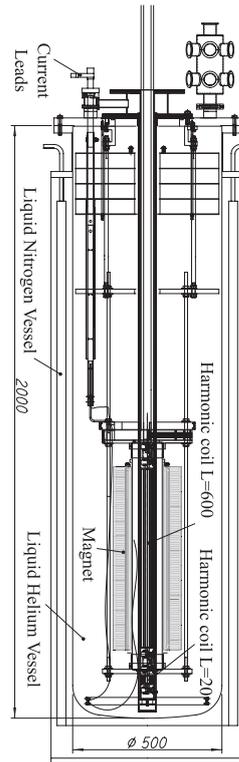


Fig. 1. Drawing of the vertical cryostat for field measurement.

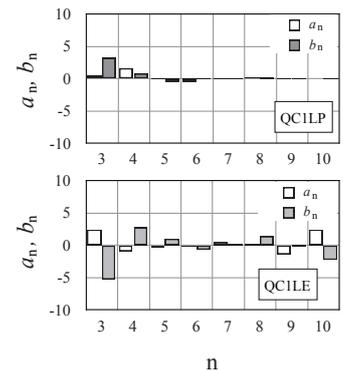


Fig. 2. Measured field multi-poles for QC1LP ($r_0=10$ mm, $I=1800$ A) and QC1LE ($r_0=15$ mm, $I=1553$ A).

参考文献

1. Y. Ohnishi, *et. al.*, Progr. Theor. Exp. Phys. 2013 (3) (2013) 03A011.
2. Y. Arimoto, *et. al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 89, 2014, p. 167.
3. N. Ohuchi, *et. al.*, Proceedings of IPAC, Dresden, Germany, 2014, p. 2693.

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム (6-3) – 超伝導ソレノイドの設計 –

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (6-3)

–Design of Superconducting Solenoid–

王 旭東, 山岡 広, 有本 靖, 川井 正徳, 近藤 良也, 宗 占国, 東 憲男, 土屋 清澄, 大内 徳人 (KEK/総研大)
 WANG Xudong, YAMAOKA Hiroshi, ARIMOTO Yasushi, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,
 HIGASHI Norio, TSUCHIYA Kiyosumi, OHUCHI Norihito (KEK/SOKENDAI)
 E-mail: wanxdon@post.kek.jp

1. はじめに

KEK は、益川・小林理論を実験的に実証した KEKB 加速器のアップグレード (SuperKEKB) を行っている。SuperKEKB の特徴は、KEKB 加速器が到達した世界最高の衝突効率を更に 40 倍高め物理実験の精度を高めようとするものである。SuperKEKB 加速器のビーム衝突領域に設置される Belle-II 検出器のソレノイド磁石は、ビームライン上に 1.5 T を発生させ、特に交差角 83 mrad を持つビームの衝突性能を著しく劣化させる。このため、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロとするように、Belle-II ソレノイド磁場と逆方向の磁場を発生する超伝導ソレノイドが必要となる。本発表は、磁場要件に基づく補正用超伝導ソレノイド磁石の設計とクエンチ解析評価について報告する。

2. SuperKEKB 超伝導電磁石システム

SuperKEKB のビーム衝突領域の超伝導電磁石システムを Fig. 1 に示す [1]。8 台の超伝導 4 極電磁石 (QC1, QC2) は、ビーム最終収束用に構成され、ビーム運転調整用には 43 台の超伝導補正多極磁石が使用される。4 台の補正用超伝導ソレノイド (ESL, ESR1-3) は、素粒子検出器 Belle-II が発生する 1.5 T のソレノイド磁場をキャンセルし、ビームライン上のソレノイド磁場の積分値をゼロするように設計される。これらの超伝導電磁石は、ビーム衝突点 (IP) の左右に 2 台のクライオスタットに組込まれる。

3. 補正用超伝導ソレノイドの磁場設計とクエンチ解析

4 台の補正用超伝導ソレノイドのコイル形状は、磁場条件のみでなく設計可能な空間的制約により、小さなコイルブロックに分割して設計された。Belle-II 単体および補正後の中心軸上のソレノイド磁場を Fig. 2 に示す。一例として、設計した ESL のロードラインと諸元をそれぞれ Fig. 3 と Table 1 に示す (断面形状は Fig. 1 参照)。ESL は液体ヘリウム冷却において、定格電流 404 A で最大経験磁場が 3.5 T となる。クエンチ解析は、(a) 冷却システムの故障等によってコイル全体に熱擾乱が加えられた場合と、(b) ビームロス等に起因して局所的なホットスポットが発生した場合について評価を行った。クエンチ検出時の遮断回路を Fig. 4 に示す。コイルの対地電圧を抑えるため、ESL のコイル #6 と #7 の間に中間リードを設けて、室温側で接地する構成である。保護抵抗 (R1, R2) は遮断時に 200 V 以下となるように設計した。回路解析と熱解析を連成し、コイル #1-12 が (a) の場合においてそれぞれクエンチした際の最高到達温度を Table 1 に示す。回路解析では、クエンチ検出間 10 ms と遮断遅れ時間 30 ms を考慮した。熱解析では、巻線のみエンタルピーを考慮し、コイル間の熱伝播を無視した。ただし、NbTi ケーブルの断面積は 1.29 mm²、銅比は 1.7 である。Table 1 より、クエンチ時の最高到達温度は超伝導特性の劣化がなく十分保護できるレベルである。(b) について 3 次元数値解析した結果を発表当日に報告する。

4. まとめ

ビームライン上のソレノイド積分磁場をゼロとするように 4 台の補正用超伝導ソレノイドを設計した。ESL のクエンチ解析の結果、劣化なく設計できていることを確認した。ESL は今年中に完成し、単体での冷却および励磁試験を行う予定である。

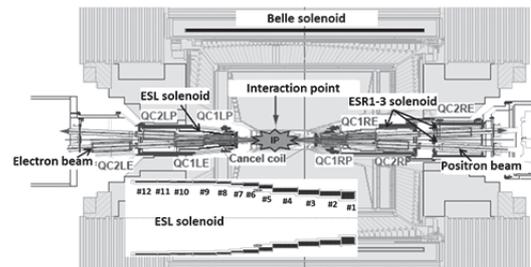


Fig. 1 Superconducting magnet system of SuperKEKB

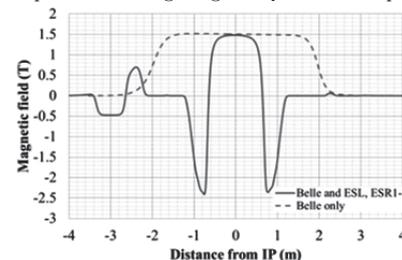


Fig. 2 Field profiles of Belle-II and the corrected

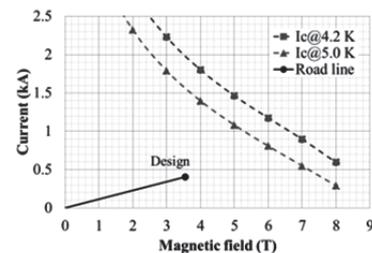


Fig. 3 Road line of ESL

Table 1 Specifications of ESL

Coil number	#1	#2	#3	#4	#5	#6
Inner radius (mm)	77.9	90.7	95.9	105.6	120.3	130.1
Outer radius (mm)	109.0	108.0	114.4	120.6	133.0	141.7
Height (mm)	43.45	76	76	93.05	46.55	51.2
NbTi cable length (m)	396.8	431.9	458.8	522	250.3	262.9
Maximum temperature (K)	103	100	98	94	122	120
Coil number	#7	#8	#9	#10	#11	#12
Inner radius (mm)	135.7	140.6	143.1	144.8	145.2	145.3
Outer radius (mm)	140.4	145.2	150.0	150.6	149.8	148.8
Height (mm)	40.35	49.65	83.75	83.75	40.35	80.65
NbTi cable length (m)	73.2	105.5	236.9	223.6	92.3	142.8
Maximum temperature (K)	43	43	42	42	43	43

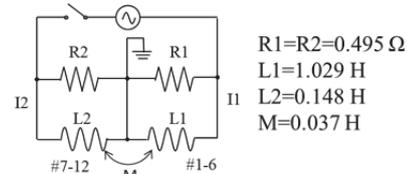


Fig. 4 Circuit model of ESL

参考文献

1. N. Ohuchi, et al.: IEEE transactions on applied superconductivity, Vol. 21 (2011) pp.1829-1832

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム(6-4) — 冷却システムの設計 —

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB — Design Cryogenic system for superconducting magnets —

川井 正徳, 近藤 良也, 大内 徳人, 有本 靖, 宗 占国, 山岡 広, 土屋 清澄, 王 旭東, 岩崎 昌子(KEK);
遠藤 友成, 河村 郁生, 森田 荘司, 古谷 雅弘, 兼清 貴之(日立プラントメカニクス)
KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, OHUCHI Norihito, ARIMOTO Yasushi, ZONG Zhanguo,
YAMAOKA Hiroshi, TSUCHIYA Kiyosumi, WANG Xudong, IWASAKI Masako (KEK);
ENDOU Tomonari, KAWAMURA Ikuo, MORITA Soshi, FURUTANI Masahiro, KANEKIYO Takayuki (HITACHI)
E-mail: masanori.kawai@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、電子・陽電子衝突型加速器 KEKB のリノシティーを約 40 倍に高めた SuperKEKB 加速器の建設が行われている。SuperKEKB 加速器のビーム衝突点では、ビームサイズを収束させ、電子・陽電子の衝突の頻度を上げるための 8 台の最終収束用超伝導 4 極電磁石(QCS)と 43 台の補正コイルが設置される。

QCS 超伝導電磁石の冷却は、TRISTAN/KEKB 実験で使用されていた冷凍能力 250W@4.3K のヘリウム冷凍機システムを移設・改造して行われる。2016 年からの SuperKEKB 加速器運転に向けて現在建設中の QCS 超伝導電磁石冷却システムの設計、建設状況、試運転結果等について報告する。

2. QCS 超伝導電磁石冷却システム

QCS 超伝導電磁石の冷却は、TRISTAN トリスタン加速器及び KEKB 加速器で使用していた冷凍能力 250W@4.3K(冷凍液化能力 160W@4K+28.4L/h)のヘリウム冷凍システムを移設・改造して行く。QCS の 4K での熱負荷は合計 62.3W+15.8L/h(そのうち単相過冷却液体ヘリウムへの熱負荷は 23.89W)となる。TRISTAN/KEKB 実験では、1 基のヘリウム冷凍機で QCS-L と QCS-R の 2 台の超伝導電磁石を冷却していたが、SuperKEKB では冷凍液化能力のマージンを 1.5 倍とした場合、(160W+28.4L/h)-(62.3W+15.8L/h)×1.5 倍(余力)×2 台=-26.9W-19.0L/h となり冷凍液化能力が不足することが分かる。また、クエンチ後の再冷却時間の短縮が加速器運転の条件にもなっていることから、SuperKEKB では 2 基のヘリウム冷凍機を使用し、QCS-L と QCS-R を其々単独のヘリウム冷凍機で冷却を行う。筑波実験棟での Belle 検出器、QCS、ヘリウム冷凍機の構成を図1に示す。

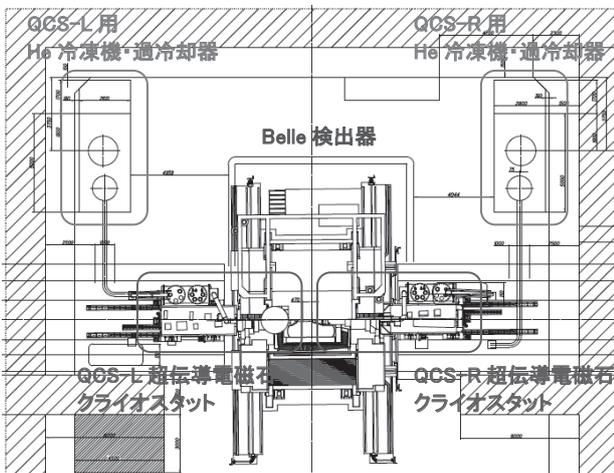


Fig.1 Layout of the QCS cryogenic system

3. QCS 超伝導電磁石の冷却パラメーター

図2に QCS 超伝導電磁石の冷却パラメーターを示す。超伝導電磁石は、サブクーラーの熱交換器により作られる 20g/s の単相過冷却ヘリウムによる強制循環冷却方式で冷却される。単相(液体)であるための許容熱負荷は、 $Q=20\text{g/s} \times (12.992\text{J/g}@4.4\text{K}-11.002\text{J/g}@4.7\text{K})=39.4\text{W}$ となり、単相過冷却液体ヘリウムへの熱負荷の合計=23.89W に対して十分に大きい事から、この冷却システムにより 20g/s の単相過冷却ヘリウムで冷却できることがわかる。

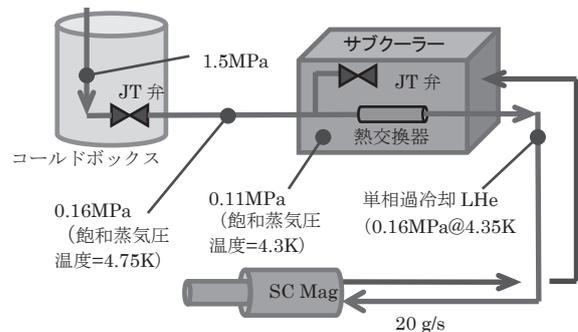


Fig.2 Cooling parameter for the QCS superconducting Magnet

4. ヘリウム冷凍システムの建設

2012 年から QCS-L 用ヘリウム冷凍システムの建設を行い、2013 年 2 月にヘリウム冷凍機単体の試運転を実施し、冷凍能力の測定と制御系を含むシステムの健全性の確認を行った。このヘリウム冷凍機は 20 年以上前に TRISTAN 加速器用に建設されたものであり、また、KEKB 加速停止後、数年間停止状態であったが、今回の試運転で冷凍機の仕様の冷凍能力が出ていることが確認できた。現在、2015 年中の完成を目指して、QCS-R 用ヘリウム冷凍機システムの建設が行われている。QCS 超伝導電磁石・補正コイルとそのクライオスタットの設計・製作も進められており、完成後はヘリウム冷凍機システムとの結合が行われ、冷却・励磁試験を行う予定である。

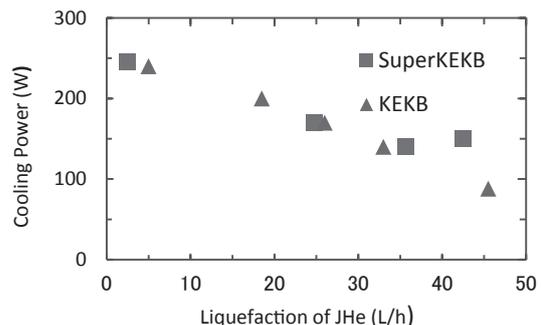


Fig.3 Refrigerating capacity

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システム(6-5)

- モニター・インターロックシステム -

Superconducting Magnet System for the Interaction Region of SuperKEKB (6-5)

- Monitoring / Interlock System -

岩崎昌子, 青木香苗, 有本靖, 大内徳人, 川井正徳, 近藤良也, 宗占国, 土屋清澄, 山岡広, 王旭東(KEK/総研大);

廣瀬雅哉(関東情報サービス); 遠藤友成(日立プラントメカニクス); 田中学, 中村卓也(三菱電機システムサービス)

IWASAKI Masako, AOKI Kanae, ARIMOTO Yasushi, OHUCHI Norihito, KAWAI Masanori, KONDOU Yoshinari, ZONG Zhanguo,

TSUCHIYA Kiyosumi, YAMAOKA Hiroshi, WANG Xudong (KEK/SOKENDAI); HIROSE Masaya (Kanto Information Service);

ENDO Tomonori (Hitachi Plant Mechanics); Tanaka Manabu, Nakamura Takuya (Mitsubishi Electric System & Service)

E-mail: masako.iwasaki@kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、KEKB 電子・陽電子ビーム衝突型加速器を用いた B ファクトリー実験が行われてきた。現在、KEKB 加速器の高輝度化を目的として、SuperKEKB 加速器の建設が進められている。SuperKEKB では、KEKB で記録した世界最高の電子・陽電子衝突頻度を約 40 倍に高めることを目指す。この高輝度化において、SuperKEKB の心臓部である、最終収束系超伝導電磁石も新しく作り変え、運転を開始する予定である。

我々は、SuperKEKB 最終収束系超伝導電磁石システム(QCS)のための、①冷却システム用、②クエンチ検出用、③磁場測定用、遠隔モニタリングシステムを構築した。これらについて、報告する。また、超伝導電磁石のクエンチ時、電磁石温度上昇時、あるいは電磁石電源インターロック作動時の、加速器保護システム動作機構についても紹介する。

2. QCS 用遠隔モニタリングシステム

図1に、QCS 用遠隔モニタリングシステムの概要を示す。モニタリングシステムは、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [1], CSS (Control System Studio) [2], および ROOT[3]を用いて構築される。EPICS は国内外の加速器、物理実験等で使用されている、分散型制御ソフトウェアである。CSS は、データアーカイブやデータ表示等、様々な機能を提供するソフトウェアツールであり、ROOT は C++言語を主体とする、データ解析用フレームワークである。

冷凍機モニタリングおよびクエンチ検出モニタリングは、SuperKEKB 加速器制御用ネットワーク内で制御されている。磁場測定は、現在は、磁場測定用ローカルネットワーク内で制御を行っているが、ビームライン上での磁場測定時には、加速器制御用ネットワーク内で制御を行う予定である。

2-1. 冷却システム用モニタリング

QCS 用冷却システムは、日立総合計装システム EX-8000 によって制御されている。ここで、加速器制御用ネットワーク

上にある、EPICS IOC (Input Output Controller) から、EX-8000 に備えられているゲートウェイを介して、冷凍機の温度、圧力等、冷却システムデータを収集し、収集されたデータを、CSS アーカイバーを用いて、データベースに蓄積するよう、システムを構築した。蓄積された冷却システムデータは、CSS がインストールされたユーザ計算機によって、リアルタイムモニタリング、トレンド表示、履歴参照が可能である。

2-2. クエンチ検出用モニタリング

超伝導電磁石クエンチ時には、クエンチ検出器が発信するトリガー信号を受けて、トランジェントレコーダーが、クエンチ前後のデータを収録する。トランジェントレコーダーがトリガー信号を受信した際は、制御ネットワーク内の EPICS IOC が、クエンチを通知する EPICS レコードを生成し、そのレコードによって、ユーザ画面にクエンチのアラームを表示、さらに、トランジェントレコーダーのデータをファイルシステムへ格納し、データを画面に表示させるモニタリングシステムを開発した。

2-3. 磁場測定用モニタリング

我々は、QCS の磁場測定制御システムを、各機器の制御に EPICS、ユーザ用インタフェース画面に CSS を用いて開発した。ここで、磁場測定用ローカルネットワークと KEK 機構内ネットワークとの間に EPICS CA Gateway を設置し、CSS がインストールされたユーザ計算機によって、磁場測定をリアルタイムでモニタリングできるように、システムを構築した。

3. まとめ

我々は、SuperKEKB QCS 用遠隔モニタリングシステムを開発した。その詳細および、インターロック作動時の、加速器保護システム動作機構について、学会で報告する。

参考文献

1. EPICS, <http://www.aps.anl.gov/epics/index.php>
2. CSS, <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css>
3. ROOT, <http://root.cern.ch/>

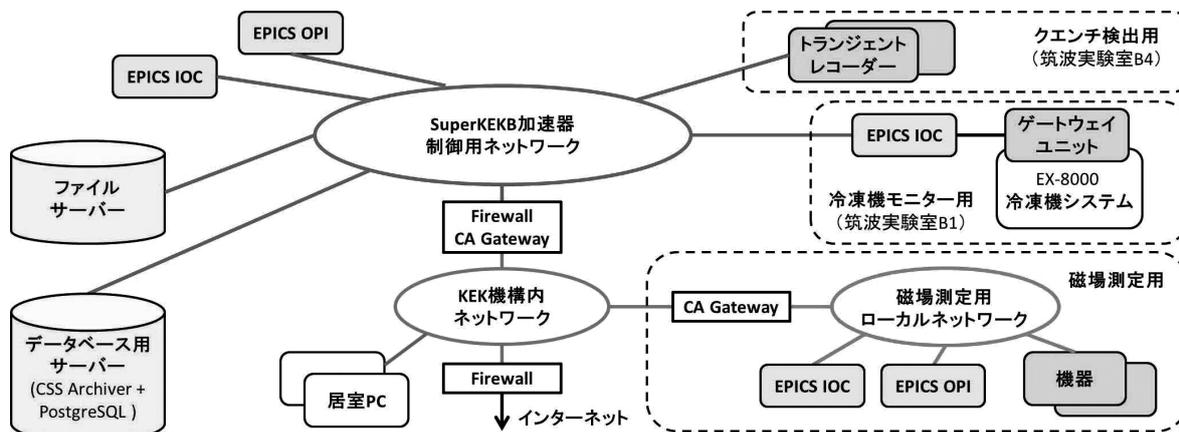


Fig1. Schematic view of the SuperKEKB QCS monitoring system.

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発(4)-テストコイルの製作

Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (4) – Test coil development

菅野 未知央, 中本 建志, 榎本 瞬, 川又 弘史 (高エネ研); 徐 慶金 (IHEP);

東 憲男, 岡田 尚起, 池本 由希子, 飯尾 雅美, 荻津 透, 木村 誠宏, 佐々木 憲一, 山本 明, 吉田 誠 (高エネ研)

SUGANO Michinaka, NAKAMOTO Tatsushi, ENOMOTO Shun, KAWAMATA Hiroshi (KEK); XU Qingjin (IHEP);

HIGASHI Norio, OKADA Naoki, IKEMOTO Yukiko, IIO Masami, OGITSU Toru, KIMURA Nobuhiro, SASAKI Kenichi,

YAMAMOTO Akira, YOSHIDA Makoto (KEK)

E-mail : michinaka.sugano@kek.jp

1. はじめに

CERN-LHC 加速器では、積分ルミノシティを現行 LHC の 10 倍以上である 3000 fb^{-1} まで向上させることを目指した高輝度化アップグレード計画 (HL-LHC) が進行中である。このために特に重要になるのが ATLAS 及び CMS 実験衝突点近傍の加速器システムの性能向上であり、KEK はビーム分離超伝導四極磁石 (D1 磁石) の開発を担当している。D1 磁石は、衝突点直近に設置される最終ビーム収束用超伝導四極磁石の後段に配置される。衝突点で同一軌道上で交差する 2 つのビームを再び分離して、別々の周回軌道に戻す役割を担う。現行の D1 は 6 台の常伝導磁石から構成されているが、これを超伝導化することで、主双極磁場を 1.28 T から 5.6 T (運転温度 1.9 K, 運転電流 12 kA) まで高磁場化でき、磁石長を 15 m 短縮することができる。これにより、四極磁石の磁石長が増加するにも関わらず、新たにクラブ空洞を設置する空間を確保できるというメリットがある。

D1 磁石製作の技術的課題として、ボア径 150 mm という大口径化に伴って増大する電磁力や鉄ヨークの飽和を考慮した設計、20 MGy と想定される放射線に耐え得る磁石開発などが挙げられる。実機の磁場長は約 6.3 m であるが、原理検証のために KEK で 2 m 長のモデル磁石の製作を予定している。今回は、モデル磁石本番に先立って行った 2 m 長のテストコイル製作の結果を報告する。テストコイル製作の目的は、以下の通りである。

- (1) 巻線に必要な治工具類の確認
 - (2) 巻線機、キュア用プレス機等の機器類の動作確認
 - (3) コイルエンドの設計と巻線および測定
 - (4) キュアリング条件の確認
 - (5) 電気試験等のコイル性能試験方法の確認
 - (6) 耐放射線 GFRP 製のエンドスペーサーを用いた巻線
 - (7) 耐放射線接着剤のキュア条件の確立
- これらの中で特に、(6)、(7)に重点を置いて報告する。

2. コイル巻線

巻線に用いたケーブルは CERN から提供された Cu/NbTi ラザフォードケーブルである。ケーブル絶縁にはポリイミドテープ (カネカ製 APICAL) および自己融着ポリイミドテープ (同 PIXEO) が用いられている。コイル直線部 2 次元断面は 4 ブロック、合計 44 ターンのケーブルで構成されている。また、ポール側から 2 ブロックについてはビーク磁場の低減のため、エンド部でさらに 2 分割されている。

エンドスペーサーとウェッジの材料として、ビスマレイミドトリアジン樹脂 (三菱ガス化学製 BT2160/2170) とホウ素を含まない S2 ガラス繊維からなる耐放射線性 GFRP を初めて実際の巻線に用いた。この材料は、従来の G10 等と比較して硬く、ガラス転移温度も高いため、コイルエンドスペーサーとしての機械的振る舞い、特にケーブルとのフィットするかどうか懸念された。実際、巻線直後の段階ではコイル最端部のエンドサドルと最外コイルブロックの間にギャップが確認された。

また、エンドスペーサーとケーブルの間の接着材には、耐放射線性のシアネートエステル樹脂 (三菱ガス化学製

BT2160RX) を用いた。この材料も加速器用超伝導コイル巻線に使用されるのは初めてである。

3. キュアリング

巻線後のコイルについて、シアネートエステル樹脂の硬化とケーブル絶縁材同士の接着を目的とした加圧熱処理を行った。熱処理温度は、シアネートエステルおよび自己融着ポリイミドの硬化条件とケーブル表面に素線間抵抗を調整するために塗布されている SnAg ハンダの融点を考慮して、 $150^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ 、 $180^\circ\text{C} \times 8\text{h}$ 、 $>190^\circ\text{C} \times 0.5\text{h}$ と設定した。

コイルには各製作段階で圧縮応力が負荷される。本コイルに関しては、キュアリングで 50 MPa、鉄ヨーク組み付け (ヨーキング) で最大 100 MPa、その後の緩和で 80 MPa が負荷され、この応力下でコイルが最終寸法に調整される設計である。つまり、ヨーキング前のコイルは最終寸法よりも大きく製作される。22 本の短尺ケーブル積層サンプルを用いた圧縮試験により、上記の応力条件を実現するためのキュアリング時のコイル寸法を求めた。キュアリング中のコイル寸法制御は、コイルを U 字溝を有するフォームブロックに挿入し、必要なオーバーサイズに対応するシムを挿入してプレスする方法により行った。さらに、コイルの端部から長手方向にも荷重を負荷した。

キュアリング後のテストコイルの全体写真を Fig. 1 に示す。巻線後にコイルエンドで確認された GFRP エンドスペーサーと巻線のギャップはキュアリングにより閉じていることが確認された。これにより、硬い耐放射線性 GFRP スペーサーが磁石製作に使用可能なことが確認できた。また、コイルを巻線マンドレルから分離した後もコイルは構造を維持しており、耐放射線接着剤のキュアリング条件が適切であったことも確認できた。

さらに、キュアリング後のコイルについて電気試験を実施した。巻線、キュアリング中に地絡のないこと、ケーブル絶縁のダメージが無いこと、コイル抵抗にキュアリング前後で変化が無いこと、サージ試験を行い 1 kV までターン間ショートが起こらないことが確認された。これにより、製作したテストコイルの電氣的な健全性も証明された。



Fig. 1 2m-long test coil after curing.

4. まとめ

LHC の高輝度化アップグレードの一環として、D1 磁石のテストコイルを製作した。巻線、キュアリングまでを完了し、コイル製作上の技術的課題の確認を行った。今後は、全長に渡ってコイルサイズ測定を行う予定である。その後、コイルの直線部を切り出し、カラーリング、ヨーキング工程の確認のための 200mm 長機械モデルの製作に使用する予定である。

BaHfO₃ 人工ピン導入 GdBCO コート線材の E - J 特性と磁化緩和に関する考察

Magnetization relaxation and E - J characteristics in a GdBCO coated conductor with BaHfO₃ artificial pinning centers

小野寺 優太, 今村 和孝, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎 (ISTEC)

ONODERA Yuta, IMAMURA Kazutaka, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: y.onodera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線材 (REBCO 線材) を用いてコイル機器を作製することで、従来よりも小型でかつ強磁界を発生させることが可能となる。ところが、アスペクト比の高い REBCO 線材においては発生させた磁界により線材自体が磁化し、その磁化が磁界の空間的均一性に影響を及ぼす。更に磁化は磁束クープにより時間とともに減衰していくため、磁界の時間的均一性にも影響を及ぼすことから、磁化緩和の定量的な把握およびこれらの解決策が求められる。しかしながら、磁化緩和の実計測においては長期間の計測が必要なため諸特性の把握が困難であり、具体的な磁化緩和の低減方法が確立されていない。

本研究では REBCO 線材の磁化緩和測定を行い、超低電界領域における E - J 特性を導出した。四端子法による実験結果とともに解析的に記述を行い、磁化緩和特性 (M - t 特性) の推定を行った。また推定方法を用いて磁化緩和の形状依存性について考察を行った。

2. 実験

実験には、BaHfO₃ 人工ピンを導入した GdBa₂Cu₃O_{7-δ} 線材を用いた。同線材を磁化緩和測定では長さ 3mm 幅 1mm、の矩形に、四端子法による測定では長さ 500μm、幅 60μm のマイクロブリッジ形状に加工し測定用試料とした。磁化緩和特性は SQUID を用いた磁化率計 (MPMS) により測定した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に四端子法と磁化緩和測定により得られた 77K での E - J 特性を示す。磁化の緩和特性から E - J 特性を以下の表式を用いて導出した。

$$J = \frac{12m}{dw^2(3l-w)} \quad (1)$$

$$E = \frac{\mu_0 G}{2d(l+w)} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

ここで d は膜厚、 l は長さ、 w は幅、 G は形状パラメータである。各印加磁場において幅広い電界領域に亘る E - J 特性が実験的に得られている。これらの実験結果に対して、我々の提出している E - J 特性の解析式を用いた考察を行った。解析式は、パーコレーション転移モデルに基づき臨界電流密度の分布および磁束のホッピングによるクープの影響を考慮したものである [1]。解析により得られた E - J 特性 (Fig. 1 実線) は、それぞれの実験結果と良く一致しており、同モデルの有効性が確認された。

Fig. 2 に Fig. 1 にて導出した解析式に対して (1), (2) 式を用いて記述した M - t 特性を示す。初期値を四端子法における電界基準 (10^{-4} V/m) とし、長時間に亘る M - t 特性を得ることができている。この記述手法を用いることで、コイル設計において問題となっている磁化緩和の影響を定量的に見積もることができる。また、解析において線材の形状パラメータを変更することによって、細線化した場合における M - t 特性を推定することが可能となる。磁化の緩和特性等の実験結果及び形状依存性については当日報告する。

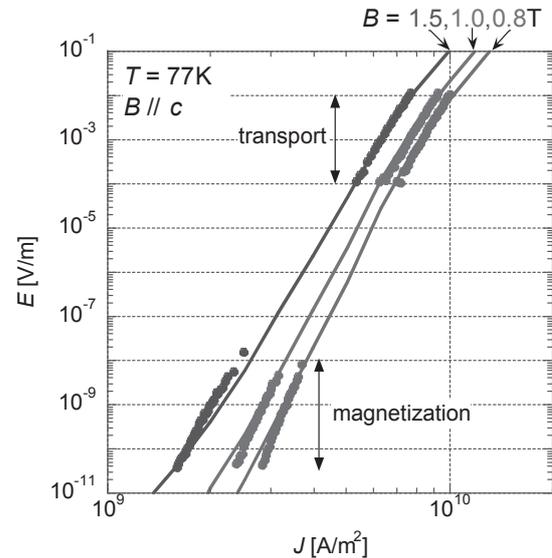


Fig. 1 E - J characteristics measured by dc four-probe and magnetic relaxation method

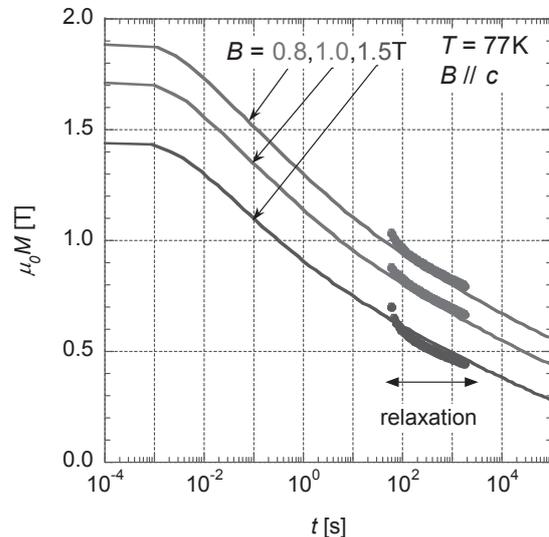


Fig. 2 M - t characteristics derived from the analytical E - J relationship

謝辞

本研究の一部は、高温超伝導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (24760235) の助成を得て行ったものである。

参考文献

1. T. Kiss, M. Inoue, T. Kuga, M. Ishimaru, S. Egashira, S. Irie, et al., *Physica C* **392-396** (2003) 1053-1062

長尺 RE-123 線材における局所 I_c 揺らぎの統計的振る舞い

Statistical behavior of local I_c fluctuation in long RE-123 coated conductors

木須 隆暢, 東川 甲平, 上津原 大, 西浦 陽平, 井上 昌睦(九大シス情);

衣斐 顕, 木村 一成, 吉田 朋, 町 敬人, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(超電導工研)

KISS Takanobu, HIGASHIKAWA Kohei, UETSUHARA Dai, NISHIURA Yohei, INOUE Masayoshi (Kyushu Univ.);

IBI Akira, KIMURA Kazunari, YOSHIDA Tomo, MACHI Takato, YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC-SRL)

E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

近年、長尺の RE-123 線材が複数の線材メーカより供給可能となり、それを用いたプロトタイプ機器の研究開発も加速している。長尺線材における臨界電流 I_c の空間的均一性は、実用性能として最も重要なものの一つとして認識されつつある。すなわち、素線内の局所的な I_c 低下は、マグネットや集合導体の安定性や信頼性、機器の性能に極めて重要な影響を及ぼす。実際、多くの線材メーカは、供給線材の基本スペックを示すデータとして、液体窒素中で測定した線材の長手方向の I_c 分布の評価結果を多くの場合添付するのが一般的となった。しかしながら、得られた I_c の均一性に関して、測定の際の空間分解能や試料長、また測定法そのものによる影響については未だ十分に理解されていない。筆者等は、Hall 素子顕微法をもとに長尺線材の I_c を連続的に評価する手法を開発し、高い空間分解能で局所 I_c 分布を計測するシステムを構築した。

本研究では、本装置によって 200 m 級長尺 RE-123 線材における空間的な I_c 変化を実験的に調べると共に、理論的考察によってその統計的振る舞いを明らかにし、最小 I_c 値の推定法の提出、ならびに線材性能としての最小 I_c 値に対するマージンについて理論的根拠に基づき議論する。

2. 実験

市販の 200 m 長の Gd-123 コート線材に対して、リール式磁気顕微鏡を用い、テープ面内のシート臨界電流密度 J_c の空間分布を全長に亘って計測した。長手(x)方向の分解能は 830 μm 、幅(y)方向の分解能は 33 μm である。各座標位置 x において y 方向の電流密度を積分し線材の長手方向の I_c の変化を導出した。Fig. 1 に得られた結果を示す。 J_c 評価の際

の残留磁化の緩和速度より電界基準を導出すると 3×10^{-8} V/m であった。 n 値モデルを用いて通常の電界基準に換算した際の I_c 値を合わせて示す。

3. 実験結果及び考察

Fig.1 より得られる、 I_c の確率分布関数の両対数プロットを Fig. 2 に示す。同図(a)は全長 200 m より得られる 10^5 のデータポイントを基に導出した結果を示す。上に凸の曲線になっている事から分かる通り、線材長が無限の極限で、出現確率がゼロとなる I_c 最小値の閾値が存在する事が分かる。また、(b)は 1 m の区間より得られた結果を示す。両者を比較すると、平均値は試料長にほとんど変化しないのに対し、観測される I_c の最小値は観測する線材長に依存し、見かけ上の最小値は線材長が長くなるほど小さくなる事を明らかとした。これは、最小値は非常に小さな頻度でしか現れないと同時に、空間的に長周期の事象であることに起因している。また、確率密度関数は、正規分布とは異なり、低 I_c 側に長い裾野を引く非対称な形を有する。これは、 I_c の低下が確率的にランダムに生じるのではなく、空間的な相関を有する事を示唆している。

当日は、1) I_c 揺らぎに対する空間周波数依存性、2) 測定空間分解能の影響、3) I_c の統計分布が示すスケール則について示すと共に、4) 有限長の試料から無限長における真の最小 I_c 値を推定するための理論的検討についても紹介する。

謝辞: 本研究の一部は、高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として、経済産業省の委託により実施するとともに、日本学術振興会の科研費(24760235)の助成を得て行ったものである。

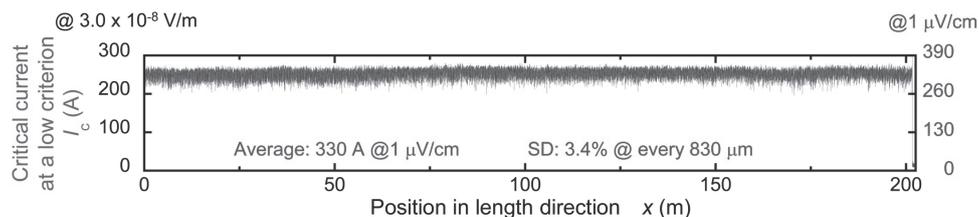


Fig. 1 Longitudinal variation of local I_c in a 200-m-long commercial Gd-123 coated conductor.

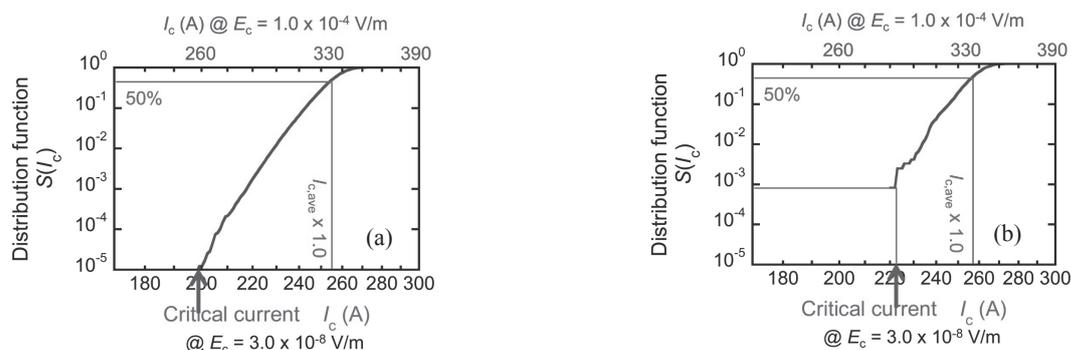


Fig. 2 Distribution function of I_c variation in (a) 200-m-long whole section and (b) 1 m section.

添加する人工ピン材料の形状が $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材のひずみ効果に与える影響

Influence of structure of artificial pinning centers on strain effect in BaHfO_3 doped $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors

宇佐美 貴史, 一野 祐亮, 吉田 隆(名大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎(SRL)

USAMI Takashi, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka (Nagoya Univ.);

YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (ISTEC)

E-mail: usami-takashi14@ees.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

$\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (REBCO) 線材は基板材料に高強度な Hastelloy が用いられるため、強力な電磁力のもとで使用可能な線材である。REBCO 線材をコイル応用する際、線材は強力な電磁力による Hoop 力にさらされるため、線材の引張ひずみ下での特性を把握することは重要である。

一方、REBCO 線材の磁場中 J_c を向上させるため、人工ピンニングセンターとして REBCO 線材に BaMO_3 (BMO; M=Zr, Sn, Hf)材料を添加することが考えられている。また、コイル応用に向けて、等方的に J_c を向上させるため、添加する人工ピンニングセンターの形状についても様々な研究が行われている[1],[2]。そこで、本研究では添加する人工ピンニングセンターの形状がひずみ効果に与える影響を明らかにするため、BHO ナノロッドを導入した GdBCO 短尺線材及び積層法を用いて BHO ナノパーティクルを導入した GdBCO 短尺線材を作製しその超伝導特性について評価した。

2. 実験方法

Nd:YAG reel-to-reel 装置を用いたパルスレーザー蒸着法により IBAD-MgO 基板上に Pure-GdBCO 短尺線材、BHO 添加 GdBCO 短尺線材を作製した。短尺線材の長さは 55 mm であり、BHO をロッド状に添加した短尺線材と、BHO をパーティクル状に添加した短尺線材を作製した。積層法を用いて BHO をパーティクル状に添加するため、基板の往復運動とターゲット交換法を組み合わせ、Pure-GdBCO 層と BHO doped GdBCO 層を交互に成膜した。基板の移動速度を 0.01 mm/s とし、基板が成膜領域中で $780^\circ\text{C}\pm 20^\circ\text{C}$ になるようヒーター温度を決定した。ターゲット-基板間距離は 55 mm、酸素分圧は 90 Pa で成膜を行った。BHO は混合ターゲット法を用いて添加した。短尺線材の組成、磁場中超伝導特性は 3 mm×10 mm に加工し評価した。結晶構造の評価は X 線回折(XRD)法、組成の評価は ICP 発光分析法、超伝導特性の評価は PPMS (Physical Properties Measurement System)を用いて行った。また、短尺線材の I_c 値は直流安定化電源を用いて試料にパルス状の電流を通電し、通電する電流値を徐々に大きくしていくことで得られた電流-電圧特性から算出した。線材の I_c を測定する際は、DC スパッタを用いて Ag 安定化層を 3 μm 蒸着させた。

3. 実験結果

XRD 測定の結果から、本研究で作製した短尺線材は良好な c 軸配向を示すことを確認した。面内配向度は、それぞれ 2° 程度であり、超伝導層である GdBCO は線材長さ方向に[100]、[010]配向であった。また、ICP 発光分析法より、線材全体の組成比が均一であることも確認した。また、Pure-GdBCO 線材について I_c 測定を行った結果 I_c は 155 A であった。

さらに磁場中超伝導特性を、PPMS を用いて評価した。Pure-GdBCO、BHO ナノロッド添加 GdBCO、BHO ナノパーティクル添加 GdBCO の T_c はそれぞれ 93.3 K、91.3 K、

91.3 K を示し 77 K での J_c^{self} はそれぞれ 2.2 MA/cm²、1.9 MA/cm²、2.2 MA/cm² を示した。金属基板上に reel-to-reel 装置を用い、移動系で成膜した線材として、良好な超伝導特性を示したと考えられる。また、作製した線材の中心部と端部の磁場中超伝導特性を測定した結果、 J_c - B 曲線がほぼ同様な挙動を示したため、磁場中超伝導特性についても、線材中で均質である可能性が高いと考えられる。

Fig. 1 に 77 K、3 T における J_c の磁場印加角度依存性を示す。BHO ナノロッド添加 GdBCO で $B//c$ におけるピークが確認された。これは c 軸相関ピンによるピンニングが働いたためと考えられ BHO がナノロッド形状であると推察される。BHO ナノパーティクル添加 GdBCO についても Pure-GdBCO と比べて全磁場印加角度で J_c が向上しているため、BHO がナノパーティクル形状であると推察される。この結果、reel-to-reel 装置を用いた積層法で BHO をパーティクル状に添加することは可能であると考えられる。

今後、作製した短尺線材について一軸引張試験を行い添加する人工ピン材料の形状が GdBCO 線材のひずみ効果に与える影響について考察し、詳細を当日報告する。

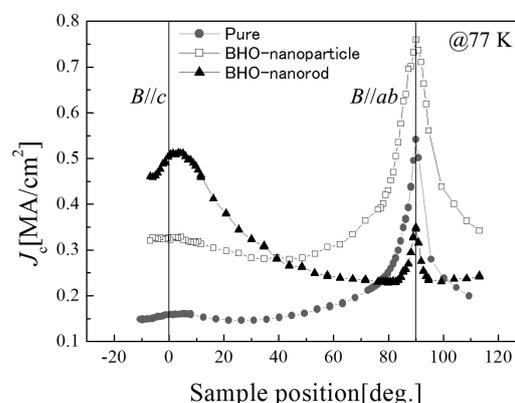


Fig.1 Magnetic field angular dependence of J_c in 3 T for pure GdBCO and BHO doped GdBCO films

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費(23226014 及び 25289358)の助成、及び高温超電導コイル基盤技術開発プロジェクトの一環として経済産業省の委託、及びリトリウム系超電導電力機器技術研究開発の一環として NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

1. A. Tsuruta, et al.: Supercond. Sci. Technol. **27** (2014) 065001
2. A. Tsuruta, et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **52** (2013) 010201

FFHR-d1 における新型ダイバータの提案とヘリカルコイル支持構造物の構造解析

Novel divertor design and structural analysis of helical coil support in the helical reactor FFHR-d1

田村 仁, 後藤 拓也, 渡辺 二太, 田中 照也, 宮澤順一, 増崎 貴, 柳 長門, 相良 明男(核融合研);
伊藤 悟, 橋爪 秀利(東北大)

TAMURA Hitoshi, GOTO Takuya, WATANABE Tsuguihiro, TANAKA Teruya, MIYAZAWA Juninch, MASUZAKI Suguru,
YANAGI Nagato, SAGARA Akio (NIFS); ITO Satoshi, Hashizume Hidetoshi (Tohoku Univ.)
E-mail: tamura@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合研で概念設計を進めているヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 は LHD の4倍の大きさ基本形とした主半径 15.6m、ヘリカルコイルの小半径 3.744m の装置である[1]。ヘリカルコイルの超伝導導体には 94kA の大電流が流れ、最大経験磁場は 12T に達する[2]。核融合炉において高熱流の粒子を受け止めるダイバータは重要な要素であり、ヘリカル型ではダイバータ磁力線構造を元々備えている。ダイバータへの熱流束は 10MW/m² 以上と予想され、いかにこの熱を除去するかが課題である。一方ヘリカル型では、ダイバータをブランケットの背後に設置することによって、中性子の直接照射を避けること可能である。中性子照射が十分低減されればダイバータの冷却配管に熱除去に有利な銅合金の使用が視野に入ってくる。FFHR-d1 の基本設計に対する中性子負荷分布解析によると、ダイバータ設置位置での照射損傷は 0.08~1.6dpa の範囲となっており[3]、照射損傷による寿命の目安を 1dpa と考えると、ピーク部分の中性子負荷を下げることで銅合金の使用が現実的となる。そのため、ダイバータの設置位置をより中性子負荷が低い場所とできないかを検討した。

2. 新型ダイバータ配置

ダイバータはプラズマ真空容器と一体化したブランケットのさらに内側に設置される。ブランケットの形状はヘリカルコイルと垂直磁場コイルを支えているコイル支持構造物の形状に大きく依存している。中性子負荷が少ないのはヘリカルコイルの裏側であり、Fig.1 のようにダイバータを移動することが望ましいが、コイル容器とトーラス形状の構造体を接続しているアーム構造物によりブランケットの設置位置が制限されている。そのため、照射損傷が特に大きい部分でアーム構造部を切り欠き、ヘリカルコイルの裏側を炉内機器が設置できる真空容器内空間へと変更する構造が提案した。この案によるダイバータへ機器への照射損傷は一桁下がると見積もられ、元々位置に対して 10 倍の寿命を見込めることになる。

3. 構造解析

新型ダイバータ構造でもコイルの幾何学的な位置および断面形状は変わらない。コイルに作用する電磁力は最大で 64MN/m の小半径方向のフープ力と±8MN/m の転倒力である。この電磁力を支えるのは、コイル容器、トーラスシェル構造体およびこれらを接続しているアーム構造部である。従ってアーム部分は重要な強度部材であり、これを部分的に切り欠くことは健全性に影響を与える。広い範囲でアーム構造を除去した場合はやはり応力が非常に大きくなってしまったため、切り欠き範囲を変えて発生する応力を慎重に評価し、さらに上下の内側垂直磁場コイル部分の構造に補強を加えることにより、一部のアーム構造を切り欠いても応力的に成立する構造を示すことに成功した。Fig.2 は最終的に決定したコイル支持構造物に対する有限要素モデルである。基本板厚等は FFHR-d1 の基本設計[2]と同じである。超伝導コイル部は REBCO 高温超伝導体を用いた導体を想定し、導体構造案[4,5]を元にマルチスケール解析手法により導体部の均質化物性値を求めて全体構造解析を行った。その結果、最大応力は von Mises

応力で 687MPa が切り欠かれたアームとコイル容器の接続部付近で発生し、構造材料として想定している SUS316LN の許容応力以下となっている。変形量の最大値は 23.5mm で上側のコイル容器とアーム接続部付近で発生している。また、ラジアルビルドが厳しいトーラス内側部分での変形により、コイル容器底板と対面する輻射シールド表面とのギャップは、定常励磁時が 62mm という設計に対しメンテナンス/建設時には 10mm となる。また、マルチスケール解析の局所解析による導体部の解析結果から、導体の巻線方向のひずみの最大値は 0.18%、導体断面内せん断応力は 35MPa となった。

参考文献

1. A. Sagara, et al., Fusion Engineering and Design **89** (2014) p.594.
2. H. Tamura, et al., Fusion Engineering and Design, **89** (2014) p.2336.
3. T. Tanaka, et al., Fusion Engineering and Design, **89** (2014) p.1939.
4. N. Yanagi, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **24** (3) (2014) 4202805.
5. 伊藤他, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会 2B-a06.

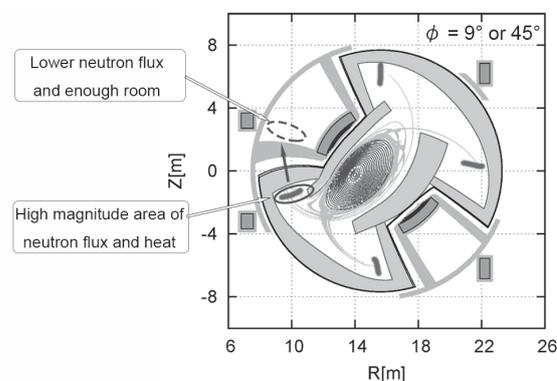


Fig.1 Plan for changing the divertor location in the region inboard of the torus.

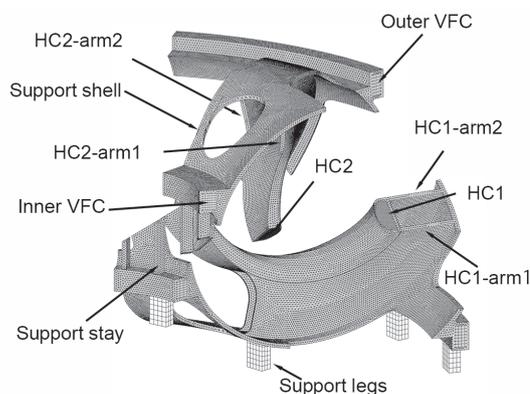


Fig.2 3D analytic model of the modified structure, including support legs and support stay.

核融合炉用超電導磁石絶縁材料の照射効果に関する研究

Study of Irradiation Effect on Insulation Material
for Superconducting Magnet of Nuclear Fusion Reactor

高橋 知寛, 三島 史人, 秋山 庸子, 西嶋 茂宏(大阪大学)

TAKAHASHI Tomohiro, MISHIMA Fumihito, AKIYAMA Yoko, NISHIJIMA Shigehiro (Osaka University)

E-mail: takahashi@qb.see.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

ITER のトロイダル磁場(TF)コイルでは, 有機高分子をマトリックスとした絶縁材料が用いられるが, 有機高分子材料は放射線感受性が高く, 核融合反応由来の中性子線や γ 線により劣化する. そのため TF コイルに照射される 1×10^{22} n/m² (0.1 MeV 以上) の高速中性子に耐える絶縁材料の開発が必要である. TF コイルの絶縁材料はガラスクロスとポリイミドフィルムを積層し, 隙間を高分子材料で含浸させたハイブリッド積層材料であるが, 一般的に層間せん断強度(ILSS)が低い. ITER の場合, 45MPa のせん断応力に耐えるだけの強度が必要である. 絶縁材料の破壊は一般的に異材間の界面で起こることが多い. これまで樹脂-ガラスクロス界面の照射効果に関しては報告されている^[1]が, 樹脂-ポリイミドフィルム界面の強度に関しては報告が少ない. そこで本研究では, ハイブリッド積層材料に放射線を照射して, 目違い切欠き試験片を用いた試験法によって ILSS を測定し, 樹脂-ポリイミドフィルム界面の放射線照射による劣化に関して調査した.

2. 実験方法

本実験ではポリイミドフィルムを含んだハイブリッド複合材料と, フィルムを含まない GFRP の二種類を用いた. ハイブリッド複合材料には S-ガラスクロスとポリイミドフィルムをそれぞれ 29 枚, 28 枚, GFRP にはガラスクロスと 37 枚交互に積層した. それらに耐放射線性の高いシアネートエステル樹脂と, エポキシ樹脂を重量比 4:6 で混合した母材を真空含浸させた. その後常圧にて 130°C で 19 時間, 150°C で 28 時間熱処理をした. 作製した材料は目違い切欠き試験片の形状に加工した. その形状を Fig.1 に示す. 加工した試験片には γ 線を線量率約 208kGy/h で 10MGy まで照射した. そして液体窒素中で Fig.1 の矢印の方向から圧縮荷重を付加することにより, 切欠き間で層間せん断破壊を生じさせた. ILSS の導出は次式で表される.

$$\tau_{ILSS} = P / bL \quad (1)$$

また, マイクロスコープによる破断面観察を合わせて行い, 破壊形式に関しての考察も行った.

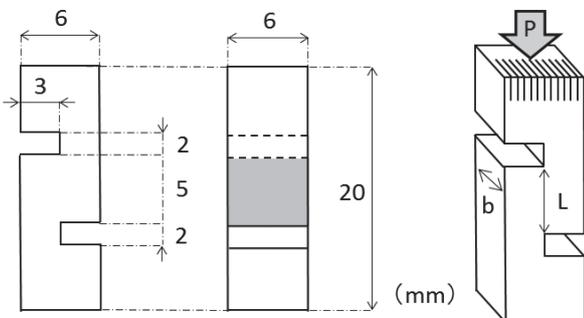


Fig.1 Geometry of specimen and load direction.

3. 結果と考察

Fig.2 は γ 線照射による ILSS の変化を表している. 混合樹脂を使用した GFRP は, 未照射に比べ照射後に若干強度が上昇する結果となった. これは照射によって高分子の架橋が生じたためだと考えられる. 破断面観察では, 樹脂-ガラスクロ

ス界面の破壊が多く見られた. 一方, ハイブリッド材料の強度は, 照射によって有意な変化が確認されなかった. さらに, 破断面観察を行った結果, いずれの吸収線量においても Fig.3 のように樹脂-ポリイミドフィルム界面の破壊やポリイミドフィルムを貫通する破壊が多く見られたため, 樹脂-ポリイミドフィルム界面は照射によって影響を受けないことが考えられた. また, ハイブリッド複合材料の強度は総じて 65 MPa を越えているため, ITER の絶縁材料として十分な強度を有しているといえる.

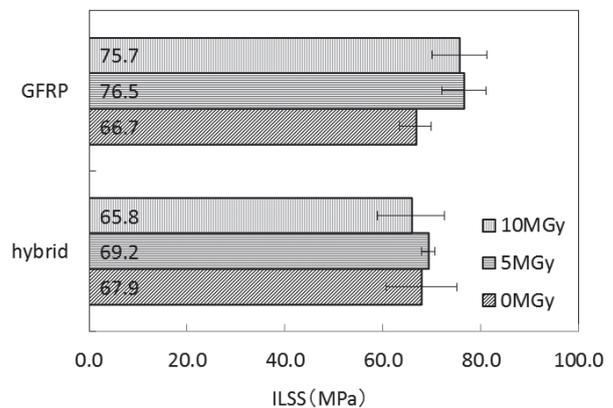


Fig.2 ILSS against gamma ray dose.

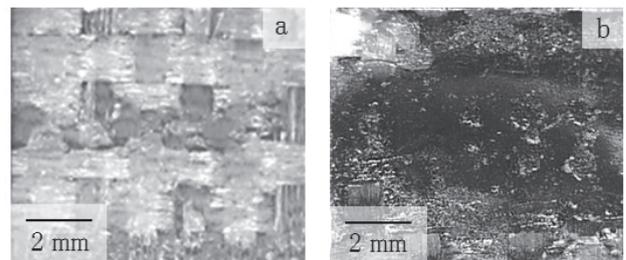


Fig.3 Images of fracture surface. (0MGy)

(a) GFRP (b) Hybrid composite material

4. まとめ

本研究ではハイブリッド複合材料の樹脂-ポリイミドフィルムの照射効果に関して調査した. その結果, 樹脂-ポリイミドフィルム界面は, 10 MGy までの γ 線では劣化しないことが明らかになった. 今後は絶縁材料中のポリイミドフィルムの挙動に関して, 力学解析を行って詳細に検討する方針である.

5. 謝辞

本研究で用いたガラスクロスやポリイミドフィルム, 樹脂は株式会社有沢製作所からご提供いただきました. また, 本研究の一部は自然科学研究機構核融合科学研究所の「NIFS 一般共同研究プログラム(NIFS13KERA008)」の助成を得て実施いたしました. この場を借りてお礼申し上げます.

参考文献

[1]M. Hayashi et al.: 26th ISS, (2013) p.214