

LHDヘリカルコイルの常伝導伝播速度の考察その2

Study on the propagation velocity of the LHD helical coil: part 2.

今川 信作

IMAGAWA Shinsaku (NIFS)

E-mail: imagawa@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)ヘリカルコイルの冷却安定性を総合的に理解するため、実機ヘリカルコイルおよびモデルコイルにおいて実測された常伝導伝播速度およびその最小値を再現できるような解析モデルの構築を進めている。モデルコイルにおいては、導体とスペーサの間に挿入された長さ 10 mm 程度のテープヒータを用いて短い常伝導部を生成し、それが拡大伝播するか否かを調べて、最小伝播電流を求めた[1]。得られた常伝導伝播速度を図1に示す。伝播速度の最小値は飽和ヘリウム中では 6 m/s であり、これよりも遅い伝播速度では1ターンを超えて伝播することはなかった。その主な理由は、導体表面の 1/3 が所定のピッチでスペーサで囲われて冷却条件が長手方向に一樣では無いためと考えられる。冷媒のサブクール度を大きくすると、同じ電流値に対する伝播速度が遅くなるだけでなく、伝播速度の最小値も上昇して、3.5 K のサブクール液体ヘリウム中では 8 m/s にまで上昇した。本研究の主目的は、真の最小伝播電流を明らかにすることである。

2. 解析モデルと解析手法

ヘリカルコイル導体は、図2に示すように、超伝導燃線、Al 安定化材、銅シースなどから構成される。各部材の導体断面内の熱拡散は早いので、超伝導燃線と Al 安定化材は1要素ずつとし、銅シースは超伝導線側と反対側の2要素とした。各々の境界面の熱抵抗は入力条件とした。常伝導伝播に伴う発熱は、電流拡散のために時間的に変化する。そのため、超伝導線要素の温度が電流分流開始温度を超えた時点時刻0として、実測された発熱変化を与えた。飽和ヘリウム中の熱伝達には、導体試料を 45 度傾けて実測した熱伝達率を用いた。

今回の計算では、ヒータ中央部を対称面(断熱条件)として長手方向に 1 mm ずつ分割して 900 mm の長さのモデルを用いて計算した。時間ステップは 0.2 ms とした。ヒータからの加熱入力は超伝導線側の銅シース要素(Cu1)に時間遅れなく与えた。

3. 解析結果

図3に、モデルコイルの実測例を示す。これは 3.0 K のサブクール状態にした後に 4.4 K 飽和ヘリウム冷却に戻した場合の通電電流 11.5 kA 時の電圧タップの出力である。各電圧タップの電圧の立ち上がり時間差とタップ間距離から伝播速度を求めることができ、この場合には、9.5 m/s と求められる。

境界面の熱抵抗を 0.4 mm 厚の Cu-2%Ni 層の3倍に相当する 30 W/m/K とした場合の通電電流 11.5 kA での計算結果を図4に示す。伝播速度は 8.7 m/s となり、実測値に近い値が得られたものの、ヒータ部分(x=0.0005 m)の常伝導転移が早すぎるし、全域で回復開始が遅い。前者の理由として、実際にはヒータと銅シース間の接触熱抵抗のためにヒータの温度が上昇し、銅シースには遅れて熱が伝わっていることが考えられる。後者の理由は、実機の常伝導伝播は片側伝播であるのに、解析ではヒータ中央断面を断熱条件としたため、反対方向への熱伝導による冷却が過小評価されているためと考えられる。

ヒータと銅シースの接触熱抵抗を考慮し、かつ、ヒータ中央の対称条件を外した解析モデルへの変更を行っている。これらの解析結果も含めて報告する。

参考文献

[1] S. Imagawa, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2 (June 2006) 755-758.

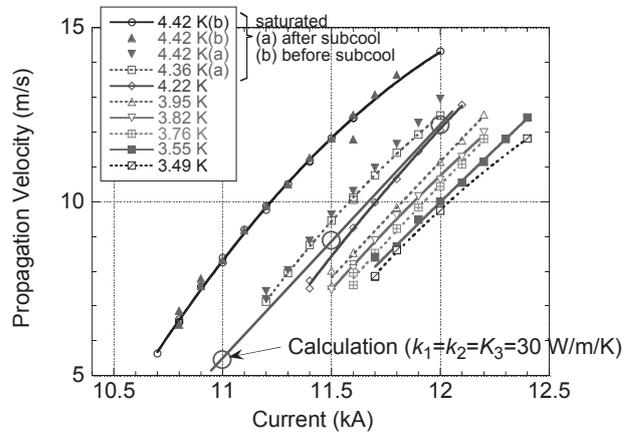


Fig. 1. Typical voltage of the helical coil conductor during a normal-zone propagation.

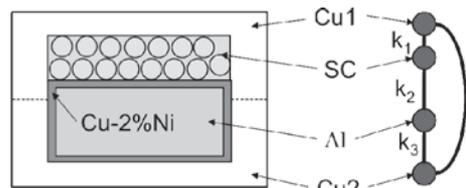


Fig. 2. A calculation model of the helical coil conductor, where k_1 , k_2 , and k_3 are transverse thermal conductivity.

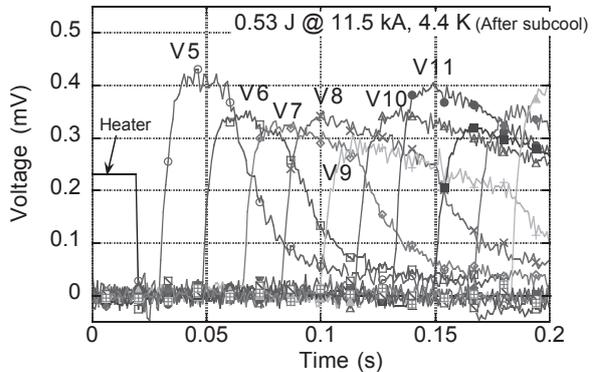


Fig. 3. Output of the voltage taps on the model coil at 11.5 kA, 4.4 K after subcool. The distance of the taps is 162 mm.

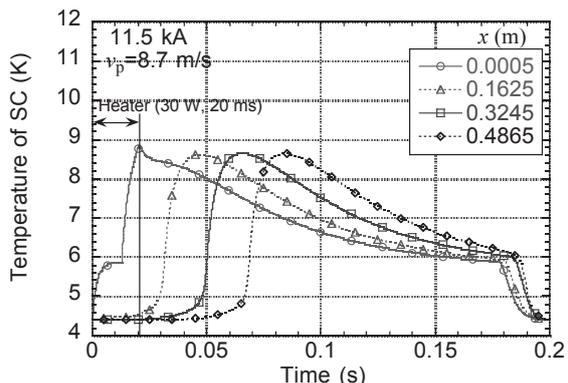


Fig. 4. Calculated temperatures of SC region at 11.5 kA, 4.4 K.

LHD 超伝導システムの高信頼化運転と改良履歴

Reliable operation and improvement of the LHD superconducting system

三戸利行、今川信作、高畑一也、山田修一、柳長門、石浩孝、岩本晃史、濱口真司、尾花哲浩、田村仁、森内貞智、大場恒揮、鷹見重幸、飯間理史、山田弘司、竹入康彦、LHD グループ (NIFS)

MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku, TAKAHATA Kazuya, YAMADA Shuichi, YANAGI Nagato, CHIKARAISHI Hirotaka, IWAMOTO Akifumi, HAMAGUCHI Shingi, OBANA Tetsuhiro, TAMURA Hitoshi, MORIUCHI Sadatomo, OBA Koki, TAKAMI Shigeyuki, IIMA Masashi, YAMADA Hiroshi, TAKEIRI Yasuhiko, LHD Group (NIFS)
e-mail: mito@nifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)は、高密度・高温の無電流・定常プラズマの閉じ込めを特徴としたヘリカル型の核融合プラズマ実験装置である。LHD 超伝導システムは磁場閉じ込めの超伝導コイル及びコイルに大電流を供給する超伝導バスライン、超伝導システム全体を低温に維持する低温システム等で構成される。1998年3月のファーストプラズマ生成から13年を経過した。この間に14回の安定な長期連続運転を実施し、高性能な核融合プラズマ実験環境を提供している。稼働率99%を超える高い信頼性の運転実績、システムの改良履歴、更なる信頼性の向上を目的とした改良計画について報告する。

2. LHD 超伝導システムの運転履歴

LHDの超伝導システムは、構成をできるだけ単純化し、運転を容易にすると共に、信頼性の向上を目的として設計・製作されている。LHD超伝導システムの運転履歴と稼働率を表1に示す。LHDは毎年度1サイクルの長期連続運転を実施している。低温システムのヘリウム液化冷凍装置用圧縮機の運転時間を基準とし、ヘリウム系内の精製運転、超伝導システムの予冷運転、定常運転、加温運転を含む全運転時間と超伝導状態を維持した定常運転の時間を積算している。2010年度の第14サイクル終了時点で、全運転時間は63,751時間、定常運転時間は42,629時間に達している。その間、低温システムの故障等により、冷却が停止した件数は25回発生したが、停止時間の合計は588時間であり、99.1%の高い稼働率を達成している。

表1. LHD 超伝導システムの運転履歴と稼働率

| サイクル /年度 | 運転時間(h) | | 停止 件数 ⁽²⁾ | 停止 時間(h) | 稼働率 (%) |
|-------------|--------------------|--------|-------------------------|-------------|------------|
| | 全運転 ⁽¹⁾ | 定常状態 | | | |
| 1/1997-8 | 2,895 | 1,350 | 4 (2) | 138.0 | 95.2 |
| 2/1998 | 3,522 | 2,359 | 2 (0) | 5.3 | 99.8 |
| 3/1999 | 5,361 | 3,965 | 5 (3) | 12.4 | 99.7 |
| 4/2000 | 5,016 | 3,538 | 1 (0) | 13.8 | 99.2 |
| 5/2001 | 5,294 | 3,791 | 1 (1) | 38.2 | 99.9 |
| 6/2002 | 4,920 | 3,366 | 1 (0) | 0.1 | 100.0 |
| 7/2003 | 5,001 | 3,446 | 2 (1) | 64.5 | 98.7 |
| 8/2004 | 4,814 | 3,216 | 1 (0) | 54.1 | 98.9 |
| 9/2005 | 5,035 | 3,470 | 1 (1) | 2.3 | 100.0 |
| 10/2006 | 5,037 | 3,436 | 0 (0) | 0.0 | 100.0 |
| 11/2007 | 5,184 | 3,607 | 2 (1) | 23.4 | 99.5 |
| 12/2008 | 3,856 | 2,272 | 1 (0) | 0.2 | 100.0 |
| 13/2009 | 3,688 | 2,152 | 2 (2) | 7.0 | 99.8 |
| 14/2010 | 4,128 | 2,591 | 2 (1) | 228.7 | 94.8 |
| 全体 | 63,751 | 42,629 | 25 (12) | 588.0 | 99.1 |

(1) 精製、予冷、定常、加温を含む全運転時間

(2) ()内の数値は定常運転中の停止件数

表2に25回のシステム停止に至った原因となる故障箇所と停止時間の関係を示す。最も回数が多く(11回)、積算した停止時間が長い(317.1時間)のは制御系に関する故障だが、圧縮機故障は、回数4回にもかかわらず、復旧に時間がかかるため、平均故障時間が61.1時間と長くなっている。表1に示した第14サイクルの運転では、精製運転開始直後にスクリー圧縮機のラストベアリングが故障し、その修理復旧に228.4時間を要したため、結果として稼働率が低下した。

表2. システムの停止原因

| 故障箇所 | 件数 | 全停止時間(h) | 平均停止時間(h) |
|------|----|----------|-----------|
| 制御系 | 11 | 317.1 | 28.8 |
| 停電 | 5 | 10.0 | 2.0 |
| 冷却水 | 4 | 7.5 | 1.9 |
| 圧縮機 | 4 | 244.4 | 61.1 |
| 操作ミス | 1 | 0.1 | 0.1 |
| 合計 | 25 | 579.1 | 23.2 |

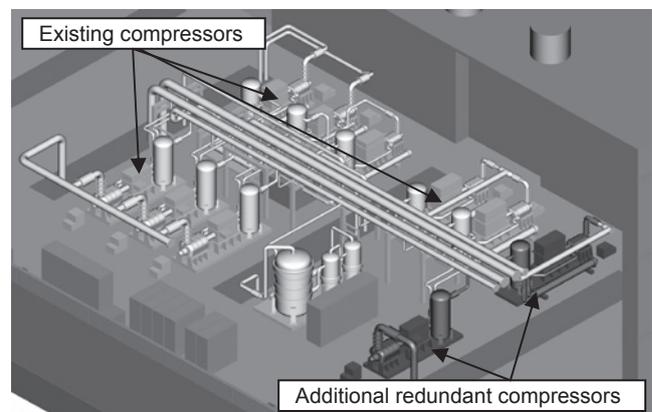


Fig. 1. Addition of the redundant compressors.

表3. 圧縮機冗長化

低段冗長機の運転条件

| 代用する圧縮機 | ロード (%) | 風量 (g/s) | 吸入/吐出圧力(MPa) | 軸動力 (kW) |
|-----------|---------|----------|--------------|----------|
| A系低段1-3号機 | 100 | 215 | 0.1013/0.412 | 368 |
| A系低段4号機 | 50 | 105 | 0.1013/0.412 | 230 |
| B系低段機 | 55 | 210 | 0.203/0.534 | 300 |

高段冗長機の運転条件

| 代用する圧縮機 | ロード (%) | 風量 (g/s) | 吸入/吐出圧力(MPa) | 軸動力 (kW) |
|-----------|---------|----------|--------------|----------|
| A系高段1-2号機 | 100 | 375 | 0.397/1.935 | 720 |
| B系高段機 | 50 | 210 | 0.520/1.935 | 475 |

3. 改良計画

ヘリウム液化冷凍装置のスクリー圧縮機は、吸入圧力0.1013MPaのA系圧縮機6台と吸入圧力0.203MPaのB系圧縮機2台の合計8台で構成されている。A系は4台の低段圧縮機と2台の高段圧縮機で構成され、B系は低段、高段、それぞれ1台の圧縮機で構成されており、吐出圧力はA系、B系共に1.935MPaである。現在は8台の圧縮機は冗長化されておらず、どの1台が故障してもヘリウム液化冷凍装置の運転を継続することができない。圧縮機で故障が発生するとベアリングの交換やスクリーの点検修理に長時間を要するため、システムの稼働率を著しく低下させる。この問題を解消し、システムの信頼性を更に向上させるため、平成23年度に低段用および高段用冗長化圧縮機を1台ずつ追加することを計画している(Fig.1参照)。冗長化圧縮機は、A系及びB系の低段、高段のどの圧縮機が故障してもバックアップできるように接続箇所を弁で切り替えられる仕様となっており、表3に示すように代用する圧縮機に応じて容量調節弁のロードを調整することにより、運転条件に対応可能となっている。

ヘリカル型核融合炉FFHRのマグネット設計の進展

Progress of superconducting magnet design for the helical-type fusion reactor FFHR

柳 長門, 田村 仁, 高畑 一也, 濱口 真司, 尾花 哲浩, 岩本 晃史, 力石 浩孝, 山田 修一,
三戸 利行, 今川 信作, 相良 明男 (NIFS); 夏目恭平 (総研大)

YANAGI Nagato, TAMURA Hitoshi, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, OBANA Tetsuhiro, IWAMOTO Akifumi,
CHIKARAISHI Hirotaka, YAMADA Shuichi, MITO Toshiyuki, IMAGAWA Shinsaku, SAGARA Akio (NIFS); NATSUME Kyohhei (SOKENDAI)
E-mail: yanagi@LHDnifs.ac.jp

1. はじめに

大型ヘリカル装置(LHD)における優れたプラズマ閉じこめ実験の進展を受けて、ヘリカル型核融合エネルギー炉 FFHR の設計が国内外の共同研究を通じて鋭意進められている[1]。FFHR の超伝導マグネットシステムは蓄積磁気エネルギーが 160 GJ に及び、特に、3次元形状をしたヘリカルコイル(大半径<17 m)には、経験磁場~13 Tにおいて電流値 100 kA 級の導体が要求される。これにどのような超伝導線材と導体を適用し、どのようなコイル巻線を構成するかは、極めて重要な工学課題である。現在、核融合科学研究所(NIFS)では、2010 年度より「核融合工学研究プロジェクト」が発足し、これまでのマグネット設計ならびに導体開発 R&D をさらに加速していくこととなった。本報告では、現状の設計と R&D の進捗状況についてまとめ、今後の方針について議論を行う。

2. 3種類の導体候補

現在のFFHRのマグネット設計において、超伝導導体としては、(1)強制冷却ケーブルインコンジット(CIC)低温超伝導(LTS)導体、(2)間接冷却 LTS 導体、(3)間接冷却高温超伝導(HTS)導体の3種類を候補として考えている。各導体方式の特長や課題、現在までの成果と今後の見通しについて、表 1 にまとめる。このうち、(1)と(2)の LTS 導体については、Nb₃Al 線材あるいは Nb₃Sn 線材を用い、(3)の HTS 導体については、Y 系線材が候補となる。また、(1)は CIC 導体であり、ITER で開発された技術の延長として位置付けられる[2]。ただし、トロイダル方向に連続したヘリカルコイルでは、冷却長の制限から超臨界ヘリウムを供給する配管構造が複雑となる。そこで、構造が簡素となる間接冷却方式の(2)と(3)を新しい試みとして立ち上げ、設計作業と平行して縮小導体の R&D を進めている。これまで、ともに 10 kA 級の短尺導体サンプルの試験を行って原理検証をほぼ完了し、今後はコイル形状のサンプル試験と 100 kA 級の短尺導体の試験を行う計画としている。

3. 2種類のヘリカルコイル巻線方法と電磁力支持設計

ヘリカルコイルの巻線については、上記3方式の導体のうち(1)と(2)の LTS 導体を使う場合は、LHD のヘリカルコイルの巻線と同様に、トロイダル方向に回転する巻線機を用いて連続的に作業を行う方針となる(図 1(a))。ここで、(1)の CIC 導体については、現地でまず導体の熱処理を行ってから巻線を行うことに注意を要する。一方、(3)の HTS 導体については、導体をヘリカル半ピッチずつで用意し、現地で接続しながら連続巻線を構成することが可能と考えられる(図 1(b))[4]。今後、具体的な検討とともに接続サンプルの試験を計画している。

一方、ヘリカルコイルに働く巨大な電磁力をいかに支えるかも重要な課題であり、コイルの外側に位置する支持構造物とコイル巻線部の双方に働く応力について、有限要素法を用いた解析を進めている。結果については、講演で紹介を行う。

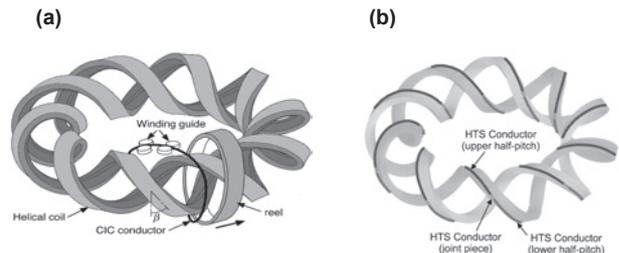


Fig. 1 Schematic illustrations of helical coil fabrication by (a) continuous winding and by (b) jointing half-pitch conductors.

参考文献

- [1] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. **83** (2008) 1690.
- [2] S. Imagawa et al., Plasma and Fusion Res. **3** (2008) S1050.
- [3] K. Takahata et al., Fusion Eng. Des. **82** (2007) 1487.
- [4] N. Yanagi et al., Plasma and Fusion Res. **5** (2010) S1026.

| | 特長 | 課題 | 現在までの成果と今後の見通し |
|--|---|---|---|
| 強制冷却 CIC 導体  | LHD~ITERで発展した技術 高い冷却安定性 低コスト Nb ₃ Sn 線材の製造技術は確立 Nb ₃ Al 線材は歪に強い | 連続ヘリカル巻線方法の開発 現地における熱処理方法の確立 ヘリカル捻り歪みの評価 冷却長制限と複雑な配管レイアウト Nb ₃ Sn 線材の繰り返し励磁劣化軽減 Nb ₃ Al 線材の供給体制の拡充 | ITER用技術の評価と検証 JT-60SA導体試験による技術の進展 Nb ₃ Al 線材の基礎実験 ヘリカル連続巻線方法の具体化 インターナルプレートの構造具体化 |
| 間接冷却 LTS 導体  (丸形状の例) | 熱処理後ジャケッティングによる 小さい熱歪みとR&W方式 均一な電流分布 簡素なコイル巻線構造 アルミニウム合金ジャケットによる 柔軟な巻線性 | 導体の冷却安定性の向上 導体の実効的熱伝導率と機械剛性の 両立 連続ヘリカル巻線方法の開発 ヘリカル捻り歪みの評価 間接冷却のための最適構造 | アルミ合金ジャケットの摩擦撹拌接合技 術の確立 コイル状サンプルの製作と試験を計画 100 kA級導体の試作と試験を計画 ヘリカル連続巻線方法の具体化 間接冷却のための構造具体化 |
| 間接冷却 HTS 導体  (丸形状の例) | 高い冷却安定性と小さい冷却パワー 高い機械的剛性(強固な線材基板と ステンレスジャケット) 分割・接続方式による巻線が可能 電力機器応用のための線材開発 | 線材の特性向上とコストの低減 線材間転位方法と導体構造の確立 分割・接続ヘリカル巻線方法の開発 ヘリカル捻り歪みの評価 低抵抗・高剛性接続方法の開発 間接冷却のための最適構造 | 短尺試験による原理検証を完了 コイル状サンプルの製作と試験を計画 100 kA級導体の試作と試験を計画 分割・接続ヘリカル巻線方法の具体化 民政応用のためのコスト低下 欧米で導体開発の気運 |

シアネートエステル／エポキシ混合樹脂を用いた 電気絶縁材料の中性子照射特性

Neutron irradiation property of insulation system with cyanate ester-epoxy blended resin

西村 新(核融合研); 泉 佳伸(福井大); 今泉 雅裕(日本化薬); 辺見 努(原子力機構); 西嶋 茂宏(阪大)
 NISHIMURA Arata (NIFS); IZUMI Yoshinobu (Fukui Univ.); IMAIZUMI Masahiro (Nihon Kayaku);
 HEMMI Tsutomu (JAEA); NISHIJIMA Shigehiro (Osaka Univ.)
 E-mail: nishi-a@nifs.ac.jp

1. はじめに

核融合炉用超伝導マグネットでは、核融合反応によって生じた中性子がブランケットを透過し、また、ポートから漏えいし、超伝導マグネットに到達する。このような中性子によって超伝導マグネットを構成する材料は放射化し、ガンマ線が発生するようになる。そのため、著者らは超伝導マグネット材料の中性子照射効果研究体制を構築し、JAEA の FNS や JRR-3 での中性子照射試験を行い、照射後試験方法の確立、照射効果の体系的な研究を目指して種々の研究を行ってきた。

本研究では、シアネートエステルとエポキシの硬化過程と試作した絶縁材料の中性子およびガンマ線照射後の層間せん断強度変化について報告する。

2. シアネートエステルとエポキシの反応

シアネートエステルとエポキシの混合によってどのような反応が生じるかを検討するため、シアネートエステルとエポキシを重量比 40 対 60 で混合し、示差走査熱量計(DSC)で硬化中の熱流束を測定した。その結果を Fig.1 に示す。硬化熱処理は 50℃から 100℃まで 10 時間、100℃で 16 時間保持後、100℃から 150℃(もしくは 160℃)まで 10 時間、150℃(もしくは 160℃)で 4 時間保持後、50℃まで 5 時間、その後炉冷である。100℃保持中に発熱のピークがあり、その後 150℃(もしくは 160℃)への昇温中にもう一つの発熱のピークがある。

100℃保持後(Sample 1)、および 150℃保持後(Sample 2)の試料を C-13 NMR で分析した結果を Fig.2 に示す。100℃保持後に Triazine 環が形成されており、すでに Open epoxy も検出される。

想定される Triazine 環の形成過程などを Fig.3 にまとめて示す。Cyanate ester は Triazine 環を形成するが、今回の実験では 100℃ですでに Triazine 環が形成されている。形成された Triazine 環は Epoxy を取り込んで Oxazolidinon (Open epoxy) となる。Fig.2 では、Sample 2 で Triazine 環、Epoxy が減少し、Open epoxy が増加していることが分かる。

3. 放射線照射による層間せん断強度の劣化

シアネートエステルとエポキシを混合比を変えて混合し、カプトン 10 層、ガラスクロス 11 層を交互に積層した積層構造に真空含浸させ、板厚 2.5mm の絶縁試料板を試作した。その試料板から 10mm^w×15mm^t×2.5mm^l の試験片を切り出し、原子炉照射、Co60 によるガンマ線照射を行った。原子炉照射では 0.1MeV 以上の中性子を 1.0×10²¹ n/m² と 1.0×10²² n/m² 照射した。JRR-3 での中性子照射では、中性子と同時に 2.5MGy/h のガンマ線を受ける。そこでガンマ線量をパラメータとして、照射後の層間せん断強度(ILSS)を整理した。その結果を Fig.4 に示す。

シアネートエステル 100%の試料では、1.0×10²² n/m² 照射でも ILSS はほとんど低下しない。しかし、エポキシを混合したものはすべて 20MPa 程度に劣化する。このような ILSS の劣化は主としてガンマ線によるものと考えられ、中性子線による ILSS の劣化とガンマ線による劣化との区別を行う必要がある。Co60 のガンマ線照射で 500MGy まで照射することは容易ではない。従って、別途新しい検討が必要である。

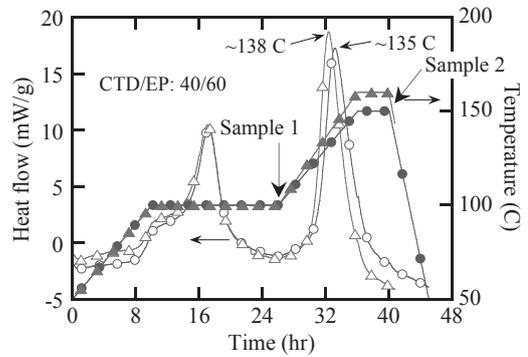


Fig. 1 Change in heat flow during curing heat treatment.

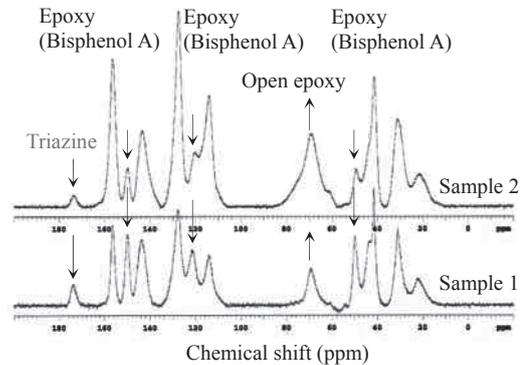


Fig. 2 Results of solid C-13 NMR.

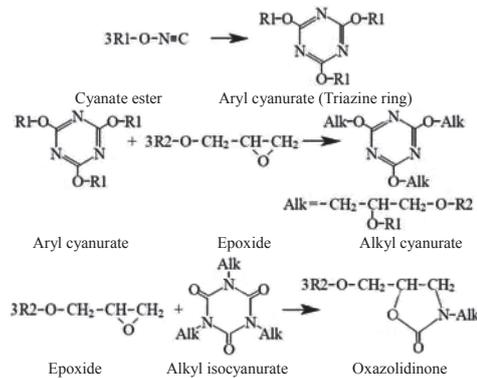


Fig. 3 Reaction process of cyanate ester/epoxy.

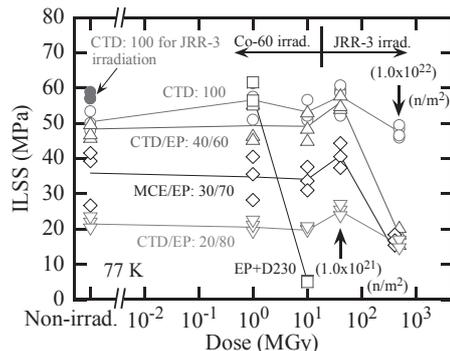


Fig. 4 ILSS against gamma ray dose.

JT-60SA ポロイダル磁場コイルにおける巻線構成部品設計

Design of the key parts for the winding pack in the JT-60SA PF coil system

土屋 勝彦, 木津 要, 村上 陽之, 吉田 清(原子力機構); 村井 隆, 岡田 泰之, 野元 一宏, 湊 恒明(三菱電機)
 TSUCHIYA Katsuhiko, KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);
 MURAI Takashi, OKADA Yasuyuki, NOMOTO Kazuhiro, MINATO Tsuneaki (MITSUBISHI Electric Co.)
 E-mail: tsuchiya.katsuhiko@jaea.go.jp

1. はじめに

日欧で設計、製造が進められている JT-60SA 装置における超伝導マグネットシステムのうち、中心ソレノイド (CS) およびプラズマ平衡磁場 (EF) コイルを構成するポロイダル磁場 (PF) コイルシステムは、日本が調達する。現在、EFコイル、CSともに、導体の製造が順調に進められ、コイル巻線作業も本格化しつつある。これに並行して、コイル巻線を構成する部品、たとえば冷媒注入口 (インレット) や巻線終端部における「巻留め」機構に関する部品の設計も急がねばならない。ここでは、高い電磁力を受けるために厳しい設計となる、CS 用インレットの設計について述べる。

2. CS用インレットの設計の問題点

CSは、最大経験磁場は8.9Tで、最大20kAで運転される。冷媒はCS巻線外側に設置され、1パスあたり、2パンケーキ分の長さの導体を、6g/sのMass flow rateで強制冷却する。インレットは、この条件を満たすよう十分な圧力損失に対するマージンを得られる程度に開口部面積をとっておく必要があり、しかも高い電磁力に耐える構造としなければならない。本インレットが設置される箇所における電磁力は、鉛直方向の圧縮力が最大35.8MPa、フープ力は導体断面積換算で87.7MPaである。

CS導体は一辺27.9mmしかないため、開口部の面積を稼ぐためには、必然的に導体長手方向に伸びる形状となる。しかし、鉛直方向の電磁力(最大の影響によって、開口部端部に応力が集中する可能性があるため、できるだけ曲率を大きくする形状とした。その一方、超伝導材に傷をつけず、このような形状の開口部を製作しなければならないという製作性の問題も生じた。CS導体は、超伝導材が本加工後に熱処理を行う必要のあるNb₃Snであるため、万が一ケーブルに傷をつけてしまうと、導体の性能劣化を引き起こしてしまう。そこで、開口部のふちの部分に、ケーブルをとりまくSUSラップを残したとしても、必要な開口部面積がとれるよう、レーストラック型開口部形状を決定し、それを3つ連ねる構造とした。(Fig.1)

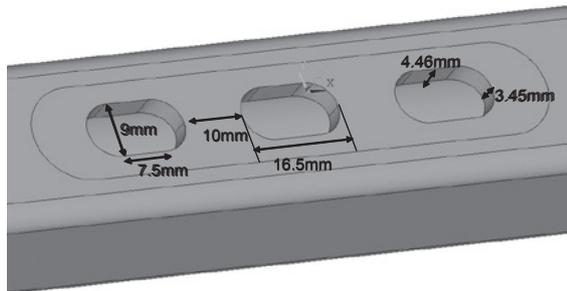


Fig.1 Design of hole on the jacket at the part of inlet for CS winding pack.

3. インレットキャップ形状の工夫

鉛直方向の電磁力に対して、上で形状を決めた開口部への応力集中を緩和するために、インレットを覆うキャップの方にも、鉛直力を負担させることを考えた。インレットキャップの形状をFig.2に示す。開口部には3つの穴があるため、それぞ

れの穴に冷媒が効率的に流れるよう、途中で3つの経路に分かれている (Fig.2 断面図参照)。ここで、本キャップが鉛直方向の圧力に耐えるには、導体接続側の厚肉部を十分確保する必要があるが、キャップ内部に屈曲部が存在するという加工性の問題もある。そこで、三つ枝部については、一旦大きく内部をえぐり、厚肉部 (Fig.2 断面図中の矢印で示す部分) を後付で溶接する方法にて製作することにした。

本キャップを前述した開口部に取り付けた構造としたモデルに基づいて応力解析を行った結果、開口部の最も応力が集中するところで491MPa、キャップのピーク応力が387MPaとなり、さらに溶接部でも640MPaであった。これらの結果、いずれも設計運転ショットに対応するサイクル数36000サイクルの疲労限界893MPaに対しても機械的強度を満たすことが確認できた。電磁力の影響としては、上述した鉛直力の他に、フープ力による影響がある。そこで、キャップの長手方向端部の形状についても、応力解析によって、応力集中の少ないテイル形状を選択した。上述したFig.2図中においては、既に考慮している。

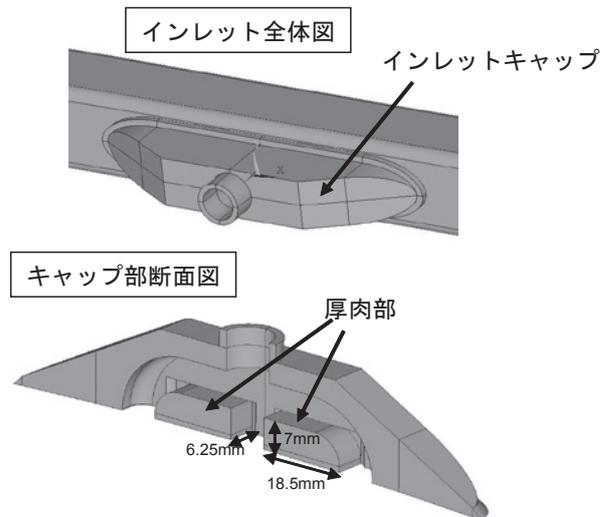


Fig.2 Design of inlet cap for CS. Upper one is the isometric view of the whole parts and lower one shows the cross sectional view of the inlet cap part.

4. まとめ

超伝導コイル巻線を構成する部品の一つであるインレット構造について、電磁力に耐えるだけでなく、製作性も考慮した形状を設計し、本設計が機械的性能も満足することを確認した。今後、本設計に基づいて製作する試験体 (CS導体ジャケットと同じSUS316LN製) を用い、低温環境下における機械試験も実施する予定である。また、他の関連部品である巻留め機構などの試作および実機製作も、CSおよびEFコイルについて進めていく。

JT-60SA の超伝導コイル給電機器設計の現状

Design status of the current feeding system for superconducting coils of JT-60SA

木津 要, 米田 昌生, 倉持 勝也, 市毛 寿一, 古川 真人, 吉田 清 (JAEA)

KIZU Kaname, KOMEDA Masao, KURAMOCHI Masaya, ICHIGE Toshikatsu, FURUKAWA Masato, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
E-mail: kizu.kaname@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の超伝導コイルシステムは、18 個のトロイダル磁場(TF)コイル、4 つのソレノイドから成る中心ソレノイド、そして、6 個のプラズマ平衡磁場コイルより構成される[1]。TF コイルは 6 コイル毎の 3 対にまとめるので、全体で 13 対のコイル給電機器が必要である。電源設備からの常伝導ブスバーがコイルターミナルボックス(CTB)と呼ぶコイル端子箱に設置された電流リード(CL)に接続される。また、CL とコイル間を超伝導導体からなる電流フィーダで接続する。CL は冷凍負荷を低減するために、高温超伝導電流リード(HTS CL)を採用し、KIT(独)が製作する。JT-60SA 用の HTS CL は W7-X 用のものを基に設計されており、コイル給電機器の設計に種々の制限を与えている。本報告では、超伝導コイル給電機器の設計検討の現状、特に、CTB の設計について述べる。

2. CTB 設計

Table 1 に CTB の主な設計条件を示す。CL の最大経験磁場の制限より、2000 以上のプラズマ平衡データベースを用いて、各場所の最大磁場を計算したところ、CL はトーラス中心から 12m 程度離れた場所に設置する必要があることがわかった。さらに、JT-60SA は既存の JT-60 の改修装置であるため、設置スペースの制限より、すべてのコイル端子を 1 つの CTB にまとめることはできず、Fig. 1 に示すように 5 個の小さな CTB(CT01-05)をクライオスタット周囲に配置することとした。これより、1 つの CTB に最大 3 対のフィーダを納める設計となった。フィーダは導体外周に絶縁を施した後にステンレス鋼製ラップを巻き付け、極間に接地板を設ける構造とし、500mm 程度のピッチでクランプにより往復導体を一体化した。

Fig. 2 に TF コイルに給電する CT01 を示した。CL の経験磁場の制限により、CTB は CL を垂直に設置する円筒の端子箱部と端子箱とクライオスタットをつなぐポート部により構成され 7m 程度のフィーダ長となる。このため、冷却による 0.3% の熱収縮により 20mm 程度フィーダが短くなり、HTS CL に大きな荷重が加わることが予想された。そこで、フィーダはポート部内で 3 箇所 の U ベンドを設け、ポート両端部にフィーダの長手方向の変位を拘束する固定サポートを設けた。固定サポート以外は、吊ボルトによる吊下げ構造として、80K 熱負荷を低減しつつ、動きの自由度を多くした。

固定サポートは 3 対のフィーダを八角形のフレームに取付け一体化し、フレームをポートの 4 方向から支持した。4 箇所 の支持部とフレームの間にサーマルアンカを設け、熱負荷を低減した。初期設計においては、フレームと支持部をパイプにより設計していたが、フレームが剛であるため、支持部との接合部に 450MPa の熱応力が発生することがわかった。そのため、フレーム、支持部ともに厚さ 6mm の板で T 字に接続しポートの径方向にはたわみやすいが、長手方向にはたわみにくい構造とすることで、フレームのたわみにより熱応力が小さくなるように改良を行った。この設計で CL に加わる荷重を評価し、水平、垂直ともに許容荷重を下回ることを確認した。

3. まとめ

CL の要求値に基づき、CTB の設計を行い、解析により確認した。今後、クライオスタット内のフィーダの設計を開始する予定である。

参考文献

1. K. Yoshida: J. Cryo. Soc. Jpn, Vol. 44, No. 8 (2009) p.346-352

Table 1 Design condition

| Item | Value |
|--|--------|
| HTS CL | |
| Max. magnetic field | <33 mT |
| Max. allowable vertical force (cold end) | <250 N |
| Max. allowable horizontal force | <560 N |
| Thermal contraction (vertical) | 4.3 mm |
| Heat load | |
| RT->80 K | <200 W |
| 80K -> 4 K | <217 W |

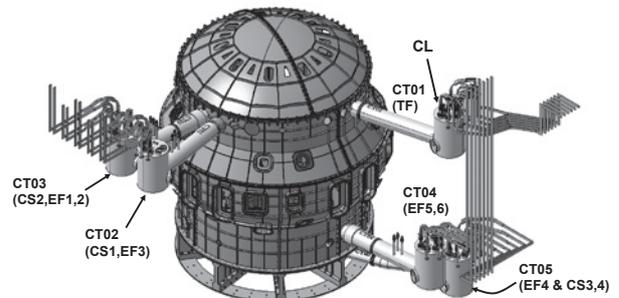


Fig. 1 Bird's eye view of JT-60SA.

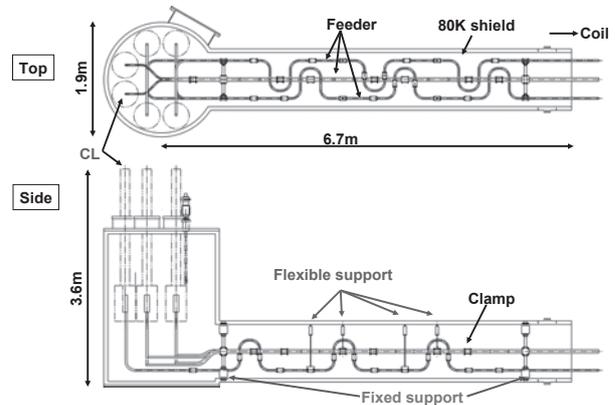


Fig. 2 Schematic drawing of CT01.

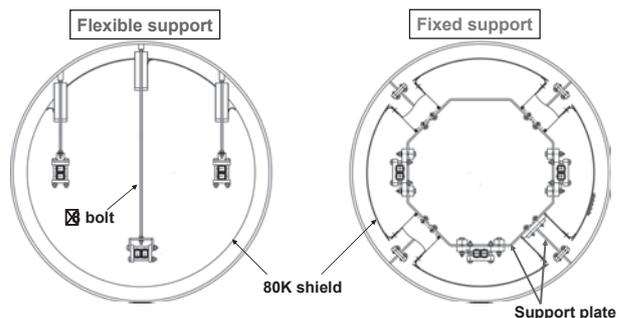


Fig. 3 Two types of support in CTB.

JT-60SA 超伝導コイル冷却用超臨界ヘリウムの非定常現象

Transient phenomena of supercritical helium for cooling JT-60SA superconducting coils

神谷 宏治, 村上 陽之, 木津 要, 市毛 寿一, 吉田 清 (原子力機構)
 KAMIYA Koji, MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, ICHIGE Toshikatsu, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
 E-mail: kamiya.koji@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60 のプラズマ閉じ込め用のコイルを全て超伝導に置き換える JT-60SA では、4.4K、0.6MPa の超臨界ヘリウムを強制循環して超伝導コイルを冷却する。JT-60SA では、2 つの超臨界ヘリウム循環ループを備え、ループ 1 で EU が製作するトロイダル磁場(TF)コイルおよび構造物を、ループ 2 で日本が担当する 4 つの中心ソレノイド(CS)と 6 つの平衡磁場(EF)コイルを冷却する。プラズマ運転時に 1K 以上の温度マージンを確保するため、CS は导体長当たり 6g/s、EF コイルで 4g/s の超臨界ヘリウムを循環させる[1]。本講演ではプラズマ運転時及び、クエンチが発生した場合の最も温度マージンの厳しい CS 冷却用ヘリウムの温度と圧力の時間変化について述べる。

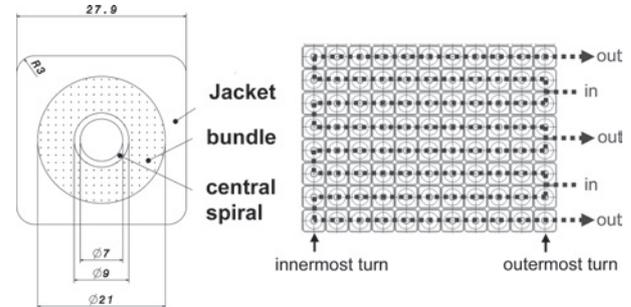


Fig. 1 Cross section of CS conductor (left) and flow scheme of pancake in CS (right)

2. プラズマ運転とクエンチ

JT-60SA のプラズマ運転シナリオから、4 つの同一モジュール中、CS2 导体についても最も厳しい条件を選定し、プラズマ運転解析を行った。クエンチはプラズマ運転中の CS2 导体内で温度マージンが最小となる加熱終了時(EOB)に生じることとした。Fig.1 に CS2 导体の形状及び 1 つのパンケーキ中の冷媒流れを図示する。超伝導导体はステンレススチール製の管(ジャケット)の中に超伝導撚り線を挿入した構造であり (Fig.1 左)、超臨界ヘリウムは半径方向 11 ターンのコイル最外ターンから導入されて、最内ターンで折り返して再び最外ターンで排出される (Fig.1 右)。

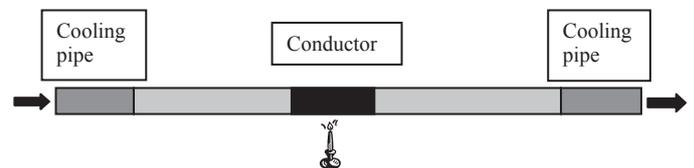


Fig.2 Calculation model for analysis

3. 計算モデルと条件

解析は GANDALF コードを用いてコイル导体の出入口側に 30m の冷媒配管が接続されたモデルで循環ループを模擬した。Fig.2 にその解析モデルの概念図を示す。超臨界ヘリウムは左から右に流れ、CS2 において最も温度マージンが小さくなる最内層ターン(モデル中央部)を時刻 t=0 で加熱しクエンチを起こした。また、クエンチ検出電圧は 0.3V で、クエンチ検出後の遮断開始までの遅れ時間を 2 秒、遮断時定数は 6 秒とした。

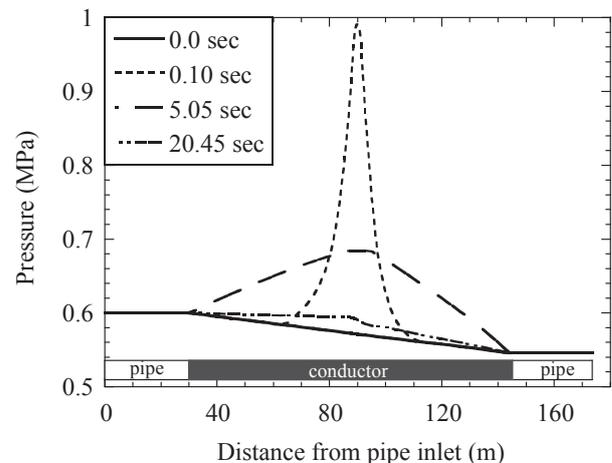


Fig.3 Evolution of pressure distribution in CS2

4. 結果

Fig.3 にプラズマ運転の加熱終了時(t=0)にクエンチが生じた場合の CS2 のヘリウム圧力空間分布の時間発展を示す。クエンチ発生 0.1 秒後に圧力は最大値 1MPa に達し、t=0.55 秒には导体全域と配管まで圧力が伝播している。このときクエンチ部で見られるヘリウム圧力勾配の急激な逆転が生じる。

Fig.4 は同じクエンチによる中心冷却チャンネルのヘリウム質量流量変化である。Fig.4 に示すように、ほぼ一定値であった質量流量が、クエンチにより导体中心で逆流している。逆流領域は循環ポンプが接続されている冷媒配管入口にまで達するが、その後 t=20 秒には、ほぼ初期の値にまで回復している。このことは、CS2 のクエンチが生じて、ループ 2 の循環ポンプは特別な運転変更を要求しないことを示唆している。

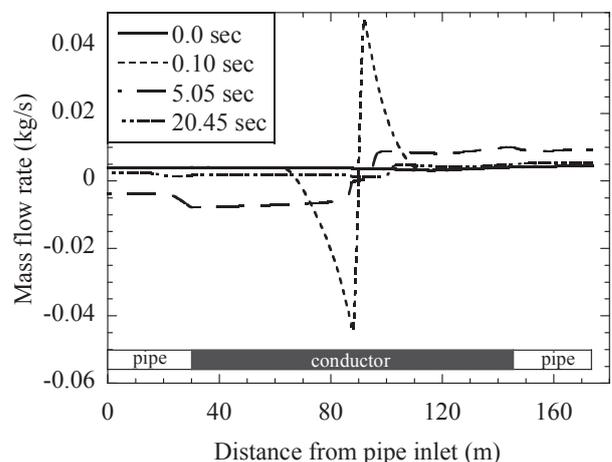


Fig.4 Evolution of mass flow rate distribution in CS2

参考文献

1. K. Kamiya, et al.: TEION KOGAKU, Vol. 46(1) (2011) p.10

JT-60SA 用サーマルシールドの支持構造の詳細設計

Detailed support design of thermal shield for JT-60SA

大西 祥広, 市毛 寿一, 星 亮, 神谷 宏治, 吉田 清 (原子力機構)

ONISHI Yoshihiro, ICHIGE Toshikatsu, HOSHI Ryo, KAMIYA Koji, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)

E-mail: ohnishi.yoshihiro@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力機構の JT-60 のトカマク本体を超伝導化する計画が、日本とEU間の共同プロジェクト「サテライトトカマク装置(JT-60 SA)」として推進されている。JT-60SA では、超伝導コイルへの放射熱の侵入を抑えるため、サーマルシールド(TS)を超伝導コイルと真空容器等室温機器間に配置した (Fig.1)。

本報告では、自重および冷却により発生する TS の変位と応力、そして真空容器サーマルシールド (VVTS) の組立て途中における変位について構造解析を行ったので報告する。

2. サーマルシールドの配置検討

JT-60SA では、JT-60U 既存設備の一部流用を計画しており、装置サイズの大きな変更はできない。しかしながら、プラズマ真空容器をサイズアップすることが計画され、各機器は接近している。それゆえ、各機器間に配置するサーマルシールドは空間的制限を大きく受けることになる。

① 最小要求空間

TS の配置検討において、TS 自身や周辺機器の熱伸縮量、製作および組立て誤差等の加算により定義した「最小要求空間」を確保できるよう設計した。また、これを満たすことができない箇所では、TS を薄くすることを計画している。

② ポートサーマルシールド(PTS)の配置

室温機器である真空容器ポートの形状は各セクションにて異なり、また極低温機器である超伝導コイルは複雑な形状となる。それゆえ、PTS の配置検討は困難を極め、Fig.2 に示すようにポート毎に異なる複雑な形状となった。

3. VVTS の組立て

TS の支持構造は TS 組立工程の中盤にて設置される。しかし、VVTS は組立工程序盤に設置するため、別途仮支持をする必要がある。そこで、VVTS の仮支持点をすでに設置している真空容器よりとることを検討しており、これにより VVTS の変位を矯正する。

① 変位について

Fig.3 には、組立て角度と Inboard-VVTS の変位の関係を示す。これより、組立て角度 20 度にて 18.7 mm の変位が確認されたが、組立て角度の増加に伴いその変位は減少するとわかった。また、360 度完成時には 3.1 mm の変位であった。

② 仮支持構造について

各支持点にてその反力を解析したところ、反力は組立て角度および固定箇所によって大きく異なることがわかった。最も大きな反力を必要とする条件は組立て角度 80 度であり、約 20 kN の負荷がかかると解析された。

4. まとめ

各機器の熱伸縮量、製作および組立て誤差等の加算により定義した「最小要求空間」を確保した TS の配置検討を行い、形状を決定した。

真空容器サーマルシールド (VVTS) の組立て途中における変位について解析を行った。結果として、VVTS 組立て時における VVTS の変位は、最大で 18.7 mm であるが、組立て角度の増加に伴いその変位は減少し完成時には 3.1 mm 程度となることがわかった。

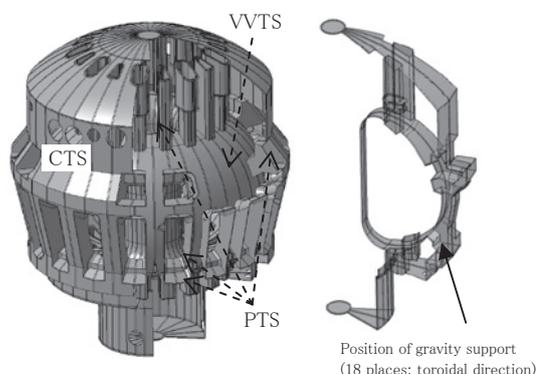


Fig.1 Overall view of Thermal Shield

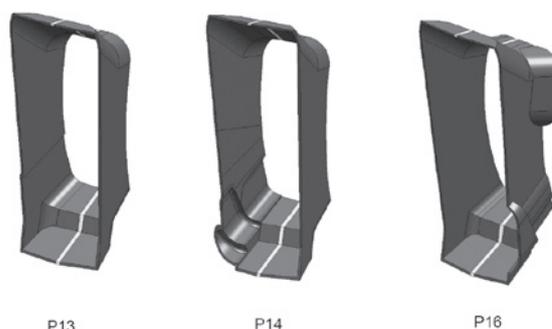


Fig.2 Port Thermal Shield (P13, P14, P16)

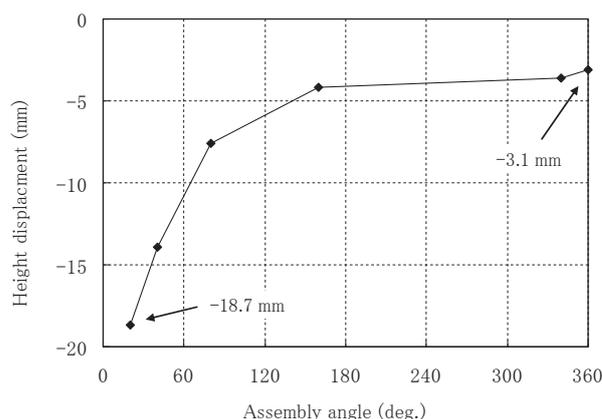


Fig.3 Height displacement during assembly process

参考文献

1. K.Kamiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.57
2. K.Kamiya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.125
3. Y.Onishi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.254

JT-60SA 平衡磁場コイル内の電圧分布測定試験

Voltage Distribution Measurement in Equilibrium Field Coil of JT-60SA

村上 陽之, 木津 要, 土屋 勝彦, 吉田 清(原子力機構); 長谷川 満, 湊 恒明, 佐古 勝久(三菱電機)

MURAKAMI Haruyuki, KIZU Kaname, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA);

HASEGAWA Mitsuru, MINATO Tsuneaki, SAKO Katsuhisa (Mitsubishi Electric)

E-mail: murakami.haruyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

JT-60SA 装置の平衡磁場(EF)コイルは、NbTi 素線を用いたケーブル・イン・コンジット導体を用い、複数のパンケーキ巻きコイルを接続し製作される[1]。超伝導コイルを問題なく動作させるためには導体間を短絡させないよう、導体間の絶縁を正常に保つ必要がある。そのため、導体間の最大電圧および絶縁物の耐電圧特性は極めて重要な設計パラメータである。

EF コイルの導体間絶縁の耐電圧特性は、EF コイル内の電圧が一樣に分布する場合を基準に設計を行っている。しかし、印加電圧の周波数が、コイル内に存在する共振周波数に近い場合、局所的に導体間電圧が高くなる危険性が指摘されている[2]。

そこで、電源の主要な周波数成分である数 kHz 以下の周波数領域に、EF コイルの共振周波数が存在しないことを確認するため、銅ダミー導体により製作されたダミーパンケーキ (Fig. 1) を用いて電圧分布測定試験を実施した。ダミーパンケーキは寸法や絶縁構成が実機と同等であるため、実機の共振現象を評価できるものと考えられる。

本発表では、これらの電圧分布測定試験の結果および導体間絶縁における耐電圧特性の設計基準の妥当性について検証したので報告する。

2. 電圧分布測定試験

ダミーパンケーキは、内径 1648mm、外径 2190mm、高さ 60mm のダブルパンケーキである。1 層あたり 18 ターンで設計されているが、ターン間渡り、層間渡りで計 1 ターンの欠損を持つため、トータルのターン数は 35 ターンである。

ターン 1, 19, 26, 30, 33, 34, 35 および巻き終りの絶縁層に穴を開け電圧タップを取り付け、各ターンの電圧を計測した。また、ファンクションジェネレータとパンケーキ間に電流を測定するため、1Ω の非誘導性の抵抗を挿入した (Fig.2)。周波数は 0.1kHz から 300kHz の範囲で変化させ試験を行った。

Fig.3 に電圧分布および電流の周波数依存性を示す。電圧、電流ともに印加電圧 (V_{in}) で規格化した値を示している。この結果、電流計測用に挿入した抵抗の電圧により、低周波数領域で V_R の電圧が上昇している。しかし、この影響を除けば、15kHz 程度までは、パンケーキ内の電圧分布はほぼ一樣で大きな変化は見られない。一方、周波数が 15kHz 以上では共振現象により電圧分布に偏りが生じることが確認できる。Fig.4 に共振周波数付近を拡大した結果を示す。この結果より、共振周波数は 56kHz 程度であることが分かった。

3. まとめ

今回の試験より、電源の主要な周波数成分である数 kHz 以下の周波数領域では、EF パンケーキ内に共振現象は生じず、ほぼ一樣に電圧が分布することが示された。以上の結果より、導体間絶縁の耐電圧特性は一樣に電圧が分布した場合を基準に設計できることが確認できた。

参考文献

1. K. Yoshida, et al.: Physica C, 470 (2010) pp. 1727-1733
2. A. Winkler, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 20 (2010) pp. 419-422

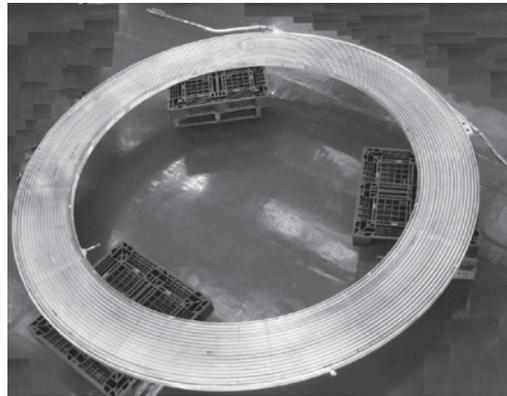


Fig.1 EF Dummy double pancake

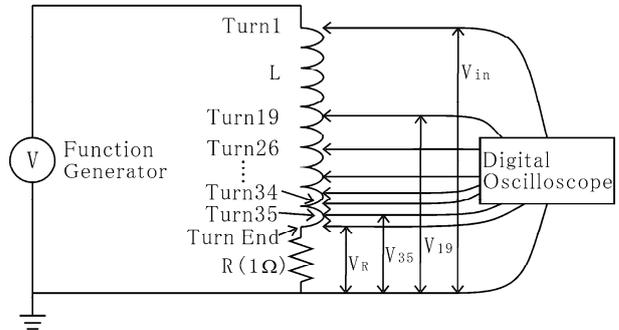


Fig.2 Instrument system setup

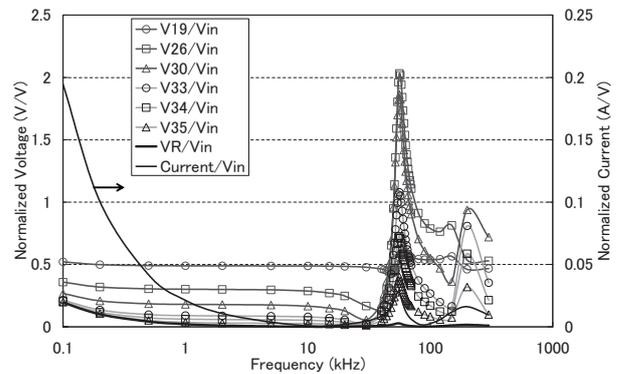


Fig.3 Voltage distribution in EF pancake

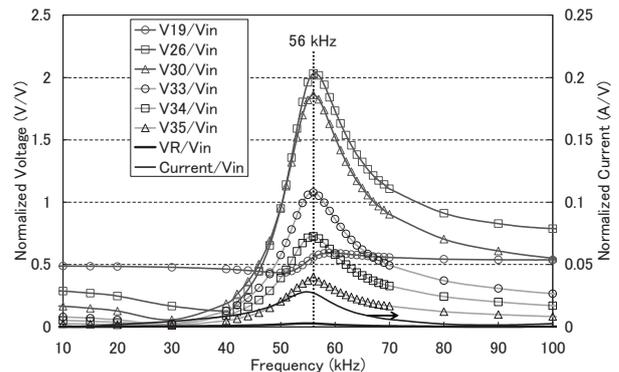


Fig.4 Voltage distribution in EF pancake (10-100 kHz)

JT-60SA 平衡磁場コイル用 CIC 導体の接続部付近における自己磁場測定 Self magnetic field measurements on JT-60SA EF coil conductors located near the joint

尾花 哲浩, 高畑 一也, 濱口 真司, 今川 信作, 三戸 利行(NIFS);
木津 要, 村上 陽之, 土屋 勝彦, 吉田 清(原子力機構)

OBANA Tetsuhiro, TAKAHATA Kazuya, HAMAGUCHI Shinji, IMAGAWA Shinsaku, MITO Toshiyuki (NIFS);
KIZU Kaname, MURAKAMI Haruyuki, TSUCHIYA Katsuhiko, YOSHIDA Kiyoshi (JAEA)
E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

1. はじめに

2007 年度から、核融合科学研究所(NIFS)の大型超伝導導体試験装置を使用して、JT-60SA プラズマ平衡磁場(EF)及び中心ソレノイド(CS)コイル用ケーブル・イン・コンジット(CIC)導体を試験する計画が、NIFS と日本原子力研究開発機構(JAEA)の共同で開始された。本計画では、CIC 導体及び導体接続部の性能評価を行っている。また、各試験条件における CIC 導体内の電流分布を理解するために、導体の自己磁場測定を行っている。本講演では、EFコイル用 CIC 導体接続部の接続抵抗測定時における導体の自己磁場測定、及び導体内での電流分布解析について発表する。

2. EFコイル用ジョイントサンプル

Fig.1 に、EF コイル用ジョイントサンプルの概略図を示す。本サンプルは、EF コイルのパンケーキジョイントとターミナルジョイントを模擬したものである。パンケーキジョイントは高磁場 EF コイル(EF-H コイル)用導体からなり、ターミナルジョイントは EF-H コイル導体と低磁場 EF コイル(EF-L コイル)用導体からなる。ジョイント形状はどちらもシェイクハンド型である。EF-H 及び EF-L コイル用 CIC 導体は、Ni メッキを施した多数の NbTi 素線を撚り合わせているが、導体接続部では Ni メッキを取り除き、導体同士は無酸素銅を介して接続している。

Fig.2 に、CIC 導体の周囲に配置した 8 つのホール素子(HS-1~HS-8)の配置図を示す。ホール素子は、y 方向の磁場を計測する。

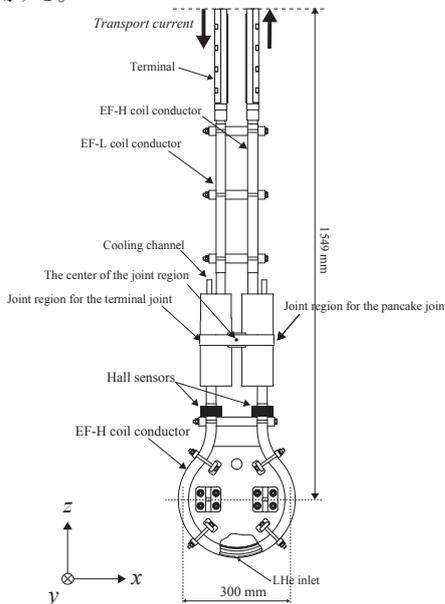


Fig.1 Schematic view of the joint sample for EF coil.

3. 自己磁場測定

本測定で使用されるジョイントサンプルは、外部磁場による接続部への影響を検証するために、導体試験装置内にある外部磁場発生用超伝導スプリットコイル間に設置した。自己磁場測定は、液体ヘリウムで浸漬冷却されたジョイントサンプルに通電した状態で、ホール素子を用いて行った。Fig.3 と

Fig.4 に、外部磁場が無い場合、及び外部磁場 3T の場合における自己磁場測定結果を示す。磁場測定の結果、外部磁場によって、自己磁場が変化することを確認した。その原因の一つとして、接続部に用いた無酸素銅の磁気抵抗が考えられる。自己磁場測定結果に基づき、簡易な解析モデルを用いて CIC 導体内の電流分布を検証した解析結果は、当日発表する。

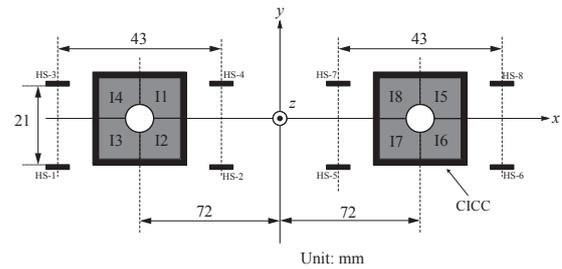


Fig.2 Layout of the hall sensors around the CIC conductors.

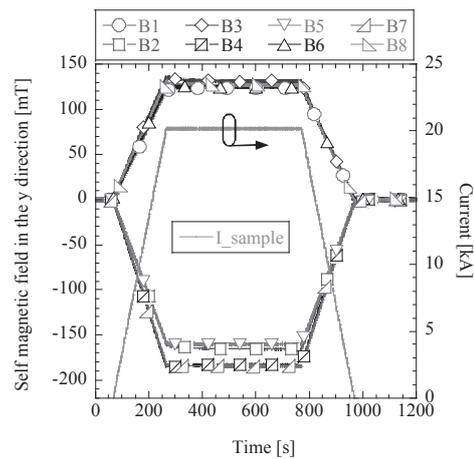


Fig.3 Measurement results of the self magnetic field without the external magnetic field.

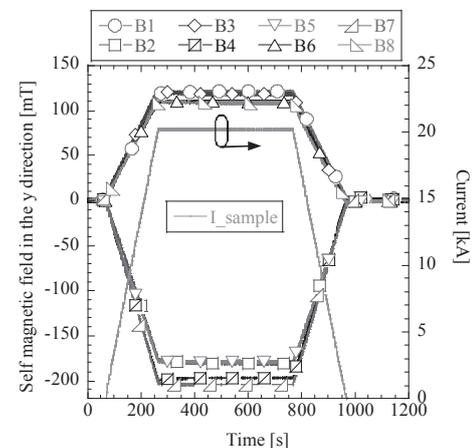


Fig.4 Measurement results of the self magnetic field under the external magnetic field of 3 T.

南極超伝導重力計による東北関東大地震観測

Tohoku Kanto large earthquake observation by superconducting gravimeter in Antarctica

池田 博 (筑波大学) 青山雄一、早河秀章、土井浩一郎、澁谷和雄 (極地研)

IKEDA Hiroshi, (University of Tsukuba), AOYAMA Yuichi, HYAKAWA Hideaki, DOI Koichiro, SHIBUYA Kazuo (NIPR)

E-mail: ikeda@bk.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生した東北関東大地震(震源位置;北緯38度6.2分、東経142度51.6分、深さ32km、マグニチュードMw:9.0)による地震波が約20分後に日本から約14000km離れた南極昭和基地で第51次南極地域観測隊夏隊により設置した第3世代の超伝導重力計(CT#058)によって明瞭に観測された。ここでは2004年12月26日のスマトラ島沖地震(マグニチュードMw:9.1)と2010年2月27日のチリ地震(マグニチュードMw:8.8)の観測記録と比較して地球自由振動の観測結果について報告する。

2. 超伝導重力計

重力の測定方法として絶対値を測定する絶対重力測定と重力差や時間的変化を測定する相対重力測定の2つに大別される。超伝導重力計は相対重力計で超伝導コイルのつくる極めて安定な磁場で浮上した1インチニオブ球の位置変化を検出することで重力の変化を測定する装置である。液体ヘリウム温度で使用しているため熱的ノイズはカットされ、絶対重力計に比べて3桁以上感度が高く、1ナノガル(10^{-11}m/sec^2)までの測定が可能である(1 μ ガル=10mmの分解能)。そのため、超伝導重力計は地球深部のダイナミクスを観測目的とするため国際観測プロジェクトGGPが組織され世界各国で観測が続行されている。南極にある超伝導重力計は日本の昭和基地が唯一である。

地球自由振動は、主に巨大地震が発生したときに起きる地球の振動で、その周期は数分から1時間の範囲である。例えば小さな鈴は高音の響きがあり、大きな釣鐘だと低音の響きがあるように物質の大きさや材質に関係した関数であり、断層活動による大きさで振幅が依存します。つまり地球も大きな釣鐘と考えると地球の振動による低周波の振動を連続的に観測することにより、地球内部構造(地球内部を構成する物質の種類や密度の分布状態などを調べる)が可能になります。

3. 昭和基地での東北関東大地震観測データ

これまで南極昭和基地の超伝導重力計では、巨大地震として2004年12月26日のスマトラ島沖地震(マグニチュードMw:9.1)と2010年2月27日のチリ地震(マグニチュードMw:8.8)を観測している。Fig.1はチリ地震と東北関東大地震の超伝導重力計により観測した重力変化の波形である。図の上段は潮汐信号を差し引いた重力残差である。チリ地震では大地震で励起された地球自由振動モード $0S_0$ (地球半径方向に均一に伸縮するモード)は地震発生から98日目の装置のノイズレベル($0.2\mu\text{Gal/rHz}$)に達するまで観測することが出来た。

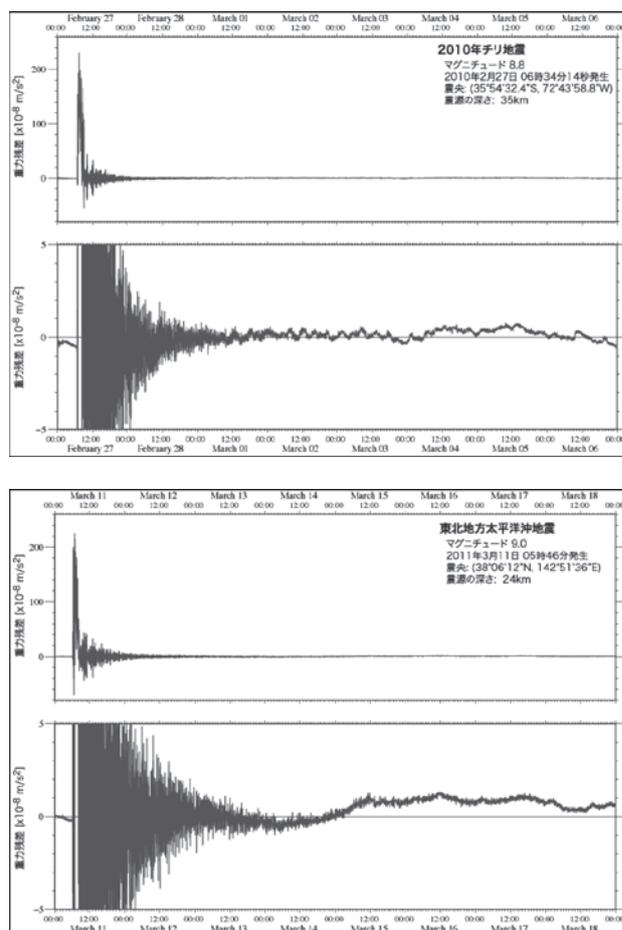


Fig.1 Superconducting Gravimeter signal

東日本大震災による J-PARC 低温設備の被害状況(1)

-中性子源用低温水素システム-

Damage of cryogenic facilities at the J-PARC caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (1)

-Cryogenic hydrogen system for a spallation neutron source-

達本 衡輝、麻生 智一、大都 起一、長谷川 勝一、櫻山 久志、川上 善彦、上原 聡明、加藤 崇(原子力機構)
 TATSUMOTO Hideki, ASO Tomokazu, OHTSU Kiichi, HASEGAWA Shoichi, SAKURAYAMA Hisashi, KAWAKAMI Yoshihiko,
 UEHARA Toshiaki, KATO Takashi (JAEA)
 E-mail: tatumoto@post.j-parc.jp

1. はじめに

J-PARC の物質・生命科学実験施設(MLF)は、陽子ビームを水銀ターゲットに入射し、発生した高速中性子をモデレータである超臨界圧の低温水素(1.5MPa, 20K 以下)と衝突を繰り返すことにより減速した冷中性子ビームによる中性子実験を行う実験施設である。低温水素システムは、3台の水素モデレータに超臨界圧水素を供給し、そこで発生する核発熱(3.75kW@1MW 陽子ビーム)を強制冷却するための冷凍設備である。2011年3月6日に、初期冷却運転を開始し、3月8日以降、共用運転(210kW の陽子ビーム運転)のための冷却運転を行っていた。3月11日14時46分にマグニチュード9.0の巨大地震が発生し、低温水素システムをはじめ、J-PARC 施設全体が自動停止した。本講演では、中性子源用低温水素システムの地震発生時の挙動およびその被害状況について報告する。

2. 低温水素システムの被災状況

超臨界圧水素を強制循環させる水素ループとそれを冷却するヘリウム冷凍機は、中性子源の近くの MLF 建屋内にあり、圧縮機は、MLF に隣接する建屋内にある。ヘリウムバッファタンク、液体窒素貯槽、圧縮機用冷却塔、および、ガス供給設備は、屋外に据え付けられている。

地震で MLF 建屋周りの地盤が最大で 1.5m 沈下した。本システムでも建屋貫通配管用のサポートが 0.75m 沈下したため、貫通部のフレキ配管(ヘリウム冷凍機の高圧、低圧配管、水素供給配管、窒素ガス供給配管、ヘリウムガス供給配管、液体窒素供給配管、および、真空配管)とその近傍の配管が変形したが、水素の漏洩はなかった。後に実施した気密試験により、配管径が大きい冷凍機の高圧と低圧のフレキ配管では、 2×10^{-1} Pam³/s 程度の漏れがあったが、それら以外の配管で漏れがないことを確認した。さらに、この地盤沈下による基礎の傾きにより、ヘリウムバッファタンク、液体窒素貯槽で最大 3% の傾斜を確認した。その後、大きな余震が度々発生しているが、それらの傾きに変化はない。

一方、MLF 屋内の配管や機器類においては、外観上の異常はなく、ブランケット層の気密や真空層の到達真空度においても正常であることを確認した。さらに、冷凍機と水素ループは、設計圧力 2.0MPaG の気密試験を行い、健全性を確認することができた。そして、2011年5月末までに、回転機器である水素ポンプ、膨張タービン、および、圧縮機の開放点検と試運転を計画している。

3. 地震発生時の低温水素システムの運転状況

地震発生時は、加速器の調整試験のために、ビーム運転は一時中断されていたが、低温水素システムは安定な冷却運転を継続していた。Fig.2 に地震時における低温水素システムの挙動を示す。地震により、水素ヒータ出力制御用の温度計 1 個が断線したが、回転体である膨張タービン、水素ポンプはいずれも定格回転数で安定な運転を維持することができた。温度計の断線から 14 秒後に発生した停電により、圧縮機、膨張タービン、水素ポンプの回転機器、真空排気装置、および、冷却水設備が停止した。ただし、制御システムだけは、UPS により保護さ

れていた。圧縮機は、スライド弁 100% の状態で停止し、Fig.2 に示すように、膨張タービンおよび水素ポンプは、インターロックにより正常に停止した。そして、アキュムレータ内のヘリウムガスがインターロックにより、放出され、アキュムレータが収縮したため、水素ループの圧力上昇はなく、安全弁等の安全装置は作動しなかった。また、地面の陥没により、埋設の計装空気配管が破断したため、停電から 3 分後に、計装空気の圧力がなくなり、自動弁は全てノーマル状態となった。水素系の放出弁も全開となり、系内の水素は、通常の放出ラインを通じて安全に屋外に放出された。このような地震による屋外設備の被害、停電、計装空気の早期喪失という異常事象に遭遇したが、低温水素システムでは、水素漏洩もなく、安全に自動停止することができた。

被害状況調査の結果に基づき、年度内のビーム運転の再開を目指して、復旧シナリオを構築する予定である。

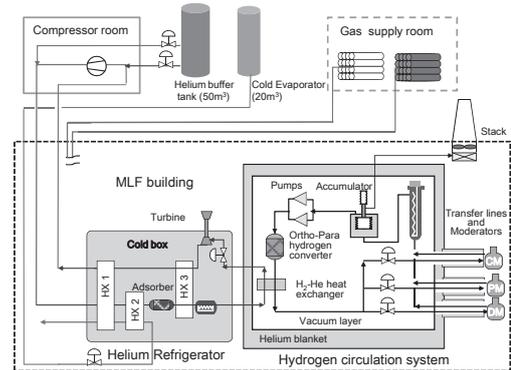


Fig. 1 Layout of the cryogenic hydrogen system

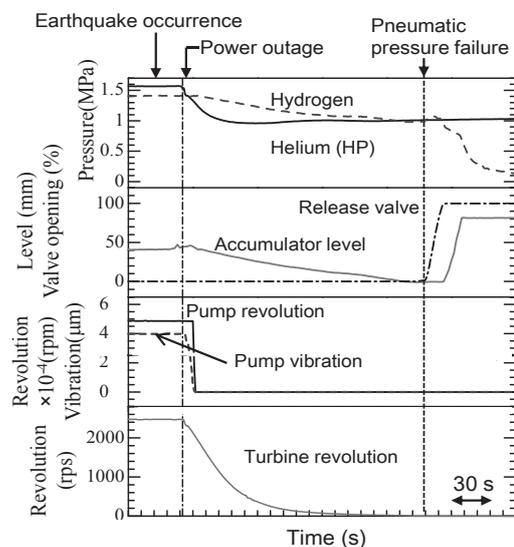


Fig. 2 Behaviors of the cryogenic hydrogen system at the earthquake.

東日本大震災による J-PARC 低温施設の被害状況(2)

-大型超伝導磁石システム-

Damage of cryogenic facilities at the J-PARC caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (2)

-Large Superconducting Magnet System-

荻津 透, 槇田 康博, 下村 浩一郎 (KEK)

OGITSU Toru, MAKIDA Yasuhiro, SHIMOMURA Ko-ichiro (KEK)

E-mail: toru.ogitsu@kek.jp

1. はじめに

2011年3月11日14時46分にM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、J-PARCのある茨城県東海村においても震度6弱の震度を観測した。J-PARCには幾つもの大型の極低温システムが存在するが、その中でニュートリノビームライン用超伝導磁石システムおよび、ミュオンビームライン用超伝導ソレノイド磁石は冷凍機によって冷却される大型の超伝導磁石システムとなっている。本講演ではこれらの大型超伝導磁石システムに関して、震災時の挙動、被害状況、および震災後の対応についてまとめると共に、復旧計画について報告する。

2. ニュートリノビームライン用超伝導磁石システム

ニュートリノビームライン用超伝導磁石システム[1]は長さ約3.6m 重さ6.5トンの超伝導磁石が28台から構成され、地上部にある4.5K 1.5kWの冷凍システムによって超臨界ヘリウムによる強制冷却をされている。地震発生時、ビームラインは休止中で磁石は励磁していなかったが、冷凍機は定常運転状態で磁石を冷却中であった。地震発生時には発生のすぐ後におこった停電に伴って冷凍機が停止した。特にガスの漏れや真空の破れと言った状態は観測されず、安全弁が吹くこともなかった。その後磁石内部のヘリウムは磁石の昇温に伴って屋外のヘリウムバッファータンクに回収された。

被害状況を Fig.1 にまとめている。ヘリウムバッファータンクの近くでは地面が約30cm 陥没し、これによって配管支持が配管から宙吊りになった。またバッファータンクの基礎およびその隣の蒸発機およびバルブユニットの基礎が1~3cm程度沈下した。これによって外部配管には多少無理な力がかかる状態になったが、恒久的な変形や曲がりを生じるようなことはなく、また明らかなヘリウムの漏洩もなかった。その後の詳細な点検作業の結果フランジ部で極微量のヘリウムリークが観測されたがフランジボルトのまし締めで解消された。この他、循環圧縮機にはわずかな軸芯のずれが観測されたが、既に調整済みである。この他、これまでの調査では上記に示した被害以外

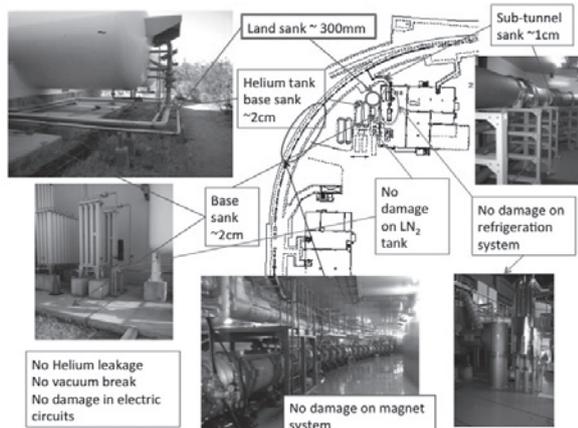


Fig.1 Damages on Superconducting Magnet System for Neutrino Beam Line

には、何の損傷も把握されていない。今後、5月中旬に磁石アライメントの確認を行い、その後試運転によるシステム健全性確認を行う予定である。

3. ミュオンビームライン用超伝導ソレノイド磁石

ミュオンビームライン用超伝導ソレノイド磁石[2]は口径6cm 長さ6m 発生磁場5Tのソレノイド磁石を冷凍機(TCF50)で冷却しているシステムである。地震発生時は定常運転状態だったが励磁電流は定格の6%程度であった。こちらのシステムも停電に伴って停止したと思われるその後昇温に伴う圧力上昇は安全弁を通してヘリウムが屋外に放出されることによって解消されたと考えられる。

被害状況を Fig.2 にまとめている。こちらのシステムにおいても MLF 建屋内部に入っていた冷凍機コールドボックスや磁石本体にはこれまでの調査の範囲では何も損傷は見られていない。また MLF 外の建物の中にあつた循環圧縮機についても目視の範囲では被害は見られていない。比較的大きな損傷が見られたのは MLF から圧縮機建物に向かう配管類で、MLF 直近の地面が大きく陥没したために配管支持架が沈下しそれに伴って配管に曲がりや変形が生じてしまった。ただし、気密検査の結果そこに漏洩がないことは確認されている。また屋外のヘリウムタンクの一部に若干の傾きが確認されている。復旧計画については現在策定中である。

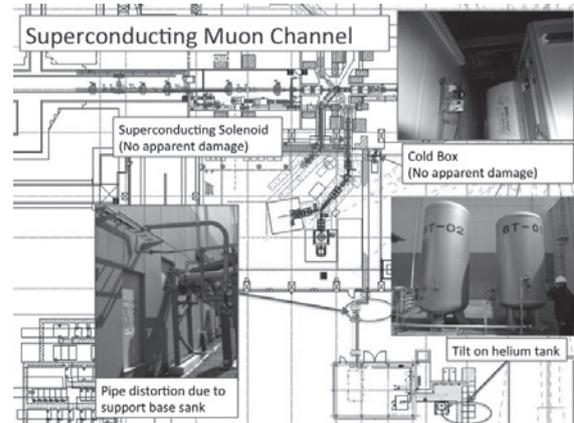


Fig.2 Damages on Superconducting Solenoid Magnet System for Muon Beam Line

参考文献

1. T. Ogitsu, Y. Makida, T. Kobayashi *et al.*, "Superconducting magnet system at the 50 GeV proton beam line for the J-PARC neutrino experiment," *IEEE Proc. Appl. Supercond.* . vol. 14, no. 2 (2004) pp 604 - 607.
2. K. Shimomura *et al.*, "Superconducting muon channel at J-PARC," *Nucl. Inst. and Meth.in Phys. Res. A*, 600, 2009, pp. 192-194.

東日本大震災による J-PARC 低温施設の被害状況(3)

-SKS 超伝導電磁石-

Damage of cryogenic facilities at the J-PARC caused by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (3)

-SKS Superconducting Magnet-

青木 香苗, 榎田 康博, 高橋 俊行(KEK)

AOKI Kanae, MAKIDA Yasuhiro, TAKAHASHI Toshiyuki (KEK)

E-mail: kanae.aoki@kek.jp

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震により、J-PARC ハドロンホール K1.8 ビームラインに設置されている SKS (Superconducting Kaon Spectrometer) 超伝導電磁石[1]は震度 6 弱の地震動を経験した。当日超伝導電磁石は定常冷却状態で励磁はされておらず、遠隔監視が行われていた。本講演では SKS 超伝導電磁石に関して、震災当日の記録されたデータ、被害の状況、実施された健全性確認の試験結果、および今後の復旧計画について報告する。

2. SKS 超伝導電磁石と冷却システム

SKS 超伝導電磁石は、浸漬冷却法を採用した扇型をした大型のダイポールマグネットで、282 t の重量がある。

その構造は、コイル容器と上部のヘリウム容器から成り、小型冷凍機 6 台をこのヘリウム容器上部に搭載している。しかし室温から冷却、液化の能力はなく、定常状態まで冷却するには、液送が必要となる。そのため、2009 年 8 月に室温からの最初の冷却を行ってから、電磁石を低温に保ってきた。

SKS は、HTC (Bi2223) 電流リードを採用しており、励磁中に HTC 電流リードに不具合があった場合のバックアップとして SUS のバイパス電流リードが並列に入っている。

SKS 超伝導電磁石は、その構造の底面に 4 つのフルーズと呼ばれる圧縮空気による空気浮上システムを持ち、床面を移動することが可能である。そのため、床に固定されてはいない。また、フルーズの床に接するゴム面に全重量が掛かるのを避けるため、接地用の SS41 架台が最下部に取り付けられている。この SS41 架台が固定されているのは、その上の扇型をした SUS 架台であり、その SUS 架台の上にヨークが載っている構造となっている。

6 台の小型冷凍機の圧縮機と超伝導電磁石電源、及び制御系はハドロンホール外の K1.8 測定機械棟の機械室に置かれている。SKS 超伝導電磁石と、機械室の機器間は、40 m のヘリウムガス用フレキシブルホース、電源ケーブル、信号ケーブルで結ばれている。

SKS 超伝導電磁石の圧力上昇に対する安全対策は、制御系を介さず機械的にガスを逃すように設計されている。具体的には、圧力の低い方から順に逆止弁、安全弁、破裂板が備えられている。このうち、逆止弁と安全弁の 2 次側は、J-PARC のヘリウム回収系システム配管に接続されている。

3. 地震発生時からの経過

停電まで地震開始から数分間稼働していた制御系の記録に依ると、上部ヘリウム容器内の液面計とコイルの歪ゲージの値に地震時の変動を見ることができた。

この停電で、地震開始から数分後には全小型冷凍機および制御系が停止した。約 300 L 内蔵していた液体ヘリウムは蒸発し自然加温となった。後日の現場確認では、SKS のヘリウム容器圧力は、逆止弁圧力を指しており内部の 300 L の液体ヘリウムは逆止弁を経て回収系に行ったと考えられる。

地震後の現場確認では、ハドロンホール周りの K1.8 測定機械棟のある壁面の陥没がひどく、ハドロンホールから K1.8 測定機械棟機械室に渡してあるラックの支柱が地面から抜けて浮いているような状態だった。また圧縮機冷却水バックアップ用チャラーの基礎も傾いてしまった。機械室内では、床に固定されてなかった超伝導電源が移動していた。

ハドロンホール内は、K1.8 ビームライン側の壁上部のコンクリートが一部砕け、SKS の近くにも破片が落ちているような状況で、立ち入りが制限された。

目視による調査では SKS 外観に大きな損傷は見つからなかった。3月29日に初めて制御系を復帰させることができた。制御系に異常は見つからなかった。この時の電磁石温度は 205 K であったが、やがて室温となった。

その後の調査で、K1.8 測定機械棟機械室の床に亀裂が入っており、機械室のハドロンホールに近い床が傾いていることがわかった。

また、SKS 超伝導電磁石は、床面のフルーズ跡から下部の SUS 架台が最大で 76 mm 程移動していることが確認されたが、扇部最下部の接地用 SS41 架台はその上の SUS 架台と固定されていた M20 ボルト全 6 本が破断していることがわかった。さらに SUS 架台とその上のヨークは元々完全に固定された状態ではなかったので SUS 架台に対してヨークは 18mm 動いていた。

コイル抵抗、テスターによる絶縁抵抗測定、真空リーク試験を経て、4月20日より液送は行わずに全冷凍機運転を開始した。これまでのところ冷凍機に関しても異常は見つかっていない。今後さらに健全性の確認を続け、秋には定常冷却状態で試験を行う予定である。

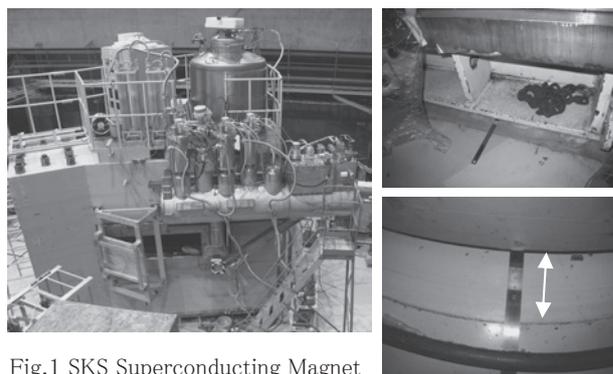


Fig.1 SKS Superconducting Magnet and Displacement

参考文献

1. K. Aoki, et al.: "Modification and Reconstruction of the SKS Superconducting Magnet - Cryogenic system by GM/JT cryocoolers -", TEION KOGAKU **45** (2010) 191-198 (in Japanese).