

HTS コイル技術の新しい展開； 第 3 世代 HTS コイル技術 / 電磁力による劣化

Evolution of HTS coil technology; 3G HTS and degradation due to an electromagnetic force

柳澤 吉紀, 前田 秀明 (理研)

YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: yoshinori.yanagisawa@riken.jp

1. はじめに

HTS コイル技術開発が新しい局面を迎えている。一つは、第 1 世代(Bi-2223)、第 2 世代(REBCO)の HTS コイルが両立できない高フープ応力耐性 / 低遮蔽電流性を実現する第 3 世代といえる新しい線材の開発と、対応した HTS コイル技術の進展である。もう一つは実スケール級コイルの試験により明らかとなってきた電磁力による REBCO コイルの劣化である。本報では、これらの技術的状況を整理し、続く発表への導入を行う。

2. HTS コイル技術の新しい展開

2.1 次世代(第 3 世代)HTS コイル技術

第 1 世代の多芯テープ Bi-2223 線材のコイルは、遮蔽電流の影響が小さく、安定・均一な磁場を発生しやすい利点があるが、線材の高 Je 特性を活かして磁石を小型にできるほどにはフープ応力耐性が高くないことが弱点である(Table 1 参照)。近年、住友電工が Ni 合金補強材を用いることで、フープ応力耐性を大幅に向上させた[1]。

第 2 世代の薄膜テープ REBCO 線材のコイルは、フープ応力耐性が非常に高く、線材の高 Je 特性を活かすことができる一方、遮蔽電流の影響が非常に大きく、安定・均一な磁場を発生させることが難しい。以前から、交流損失を低減するために超伝導層を分割(多芯化)[2]するアイデアが考えられてきたが、近年、コイルにおける遮蔽電流磁場の低減効果が実証されてきた[3]。但し、機械的な強度の劣化も報告されている。

Bi-2212 線材は超伝導線材の理想的な姿(ツイストしたマルチフィラメントの丸線)で、遮蔽電流の影響も小さいと予想される。しかし、高温かつ温度精度の高い熱処理を必要とする wind and react 法で作られるため、大きく十分な特性のコイル製造が難しい。近年 NHMFL のグループが、高圧熱処理により十分高い電流密度が得られることを示している[4]。また、このコイルは従来の Bi-2223 と同様にフープ応力への耐性が低いことが問題であるが、これを解決するために Ni 合金補強材の導入も検討され始めている[5]。

これら、従来の HTS 線材・コイルの弱点を克服し、高フープ応力耐性と低遮蔽電流磁場性を両立する「第 3 世代」と呼ぶ HTS コイル技術が進展してきた[6]。

2.2 電磁力による新しいタイプの劣化

REBCO コイルは剥離を起こしやすく、とりわけエポキシ含浸コイルにおいては冷却時の熱応力によって劣化が頻発する[7]。これまで、非含浸やパラフィン含浸など、含浸方式で剥離を避ける方法[7]や、エポキシ含浸しても劣化しない対策技術[8-10]が開発されてきた(Table 2 参照)。ところが、実スケールに近いコイルを強い電磁力下において試験することで、新しいタイプの劣化が起きることが明らかになってきた。具体的な現象は後の発表で示すが、劣化の本質的な原因はやはり剥離のしやすさ、さらに、薄いテープ線材ならではの曲げ剛性の低さである。Table 2 に示すように、今後、熱応力と電磁力の両者に対して耐えることのできるコイル技術開発が必要である。

3. 本セッションにおける発表

本セッションでは、第 3 世代 HTS コイル技術と電磁力による劣化それぞれに関し、最新の研究結果を 2 件ずつ報告する。

- 1B-a02 では、多芯 REBCO コイルにおいて懸念される結合

Table 1. The generations of HTS coils.

	1G HTS (Bi-2223)	2G HTS (REBCO)	Next G (3G) HTS candidates •High strength Bi-2223 •Multifilamentary REBCO •Over pressure Bi-2212
Mechanical property (hoop stress tolerance)	△ Insufficient	○ Strong	?
Screening current-induced field	○ Small	△ Large	?
	Current perspective		New perspective

Table 2. The origins of degradation of REBCO coils and countermeasures.

		Origin of degradation	
		Thermal stress	Electromagnetic force
Impregnation methods	• Dry winding • Paraffin wax impregnation	○	⚠ Problems > Delamination at joints > Buckling > Conductor movement Remedies > External joint > Winding tension > Binder
	• Epoxy impregnation	⚠ Problems • Delamination Remedies > Polyimide coating > Teflon co-winding > Thermal shrink tube	○
		Current perspective	
		New perspective	

電流の影響の定量化を初めて行ったので報告する。

- 1B-a03 では、高強度 Bi-2223 コイルの高フープ応力耐性/低遮蔽電流磁場性の両立性を報告する。特に低磁場での遮蔽電流磁場特性について、重要な知見が得られた。
- 1B-a04 と 1B-a05 では、高磁場中の REBCO コイルにおける、電磁力に起因した応力集中と線材の動きによる劣化を報告する。電磁力による劣化の報告は本報がはじめてである。

本研究の一部は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ)の支援によって行われた。

参考文献

- [1] T. Nakashima, et al., IEEE TAS, 25 (2015) 6400705
- [2] T. Machi, et al., Super. Sci. Tech., 26 (2013) 105016
- [3] Y. Yanagisawa, et al., IEEE TAS, 25 (2015) 6603705
- [4] D. Larbalestier, et al., Nat. Mat., 13 (2014) 1-7
- [5] D. Larbalestier, et al., MT24, 2OrAc_01, Seoul, Oct. 2015
- [6] Y. Yanagisawa, et al., Super. Sci. Tech., 28 (2015) 125005
- [7] T. Takematsu, et al., Physica C, 470, 674-677, 2010
- [8] U. Trociewitz, et al., Appl. Phys. Lett., 99 (2011) 202506
- [9] Y. Yanagisawa, et al., Physica C, 476 (2012) 19-22
- [10] H. Miyazaki, et al., IEEE TAS, 24 (2015) 4600905

高フープ応力耐性と低遮蔽電流性を両立する HTS コイル技術に向けて(1) ～スクライブタイプの REBCO 線材を用いたコイルに生じる遮蔽電流～

Towards HTS coil technology with combination of high hoop stress tolerance and small screening current induced field (1)

～Screening current induced in a scribed REBCO conductor coil～

上野 健志, 梶田 健太郎, 高尾 智明(上智大); 松田 徹郎, 岡村 哲至(東工大); 濱田 衛(JASTEC); 柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

UENO Takeshi, KAJITA Kentaro, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); MATSUDA Tetsuro, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech Univ.); HAMADA Mamoru (JASTEC); YANAGISAWA Yoshinori, MAEDA Hideaki (RIKEN)

E-mail: takeshi.ueno@riken.jp

1. はじめに

高磁場かつ高精度磁場でコンパクトな NMR 磁石を実現するには、>300 MPa のフープ応力耐性と低遮蔽電流磁場特性を両立する新しい HTS 線材(第3世代)が必要である。我々は、スクライブによって多芯化した REBCO 線材は遮蔽電流磁場の低減に有効であることを報告したが[1]、この種の線材では、機械強度が低い欠点があった。最近、スクライブ工程の後に銅メッキする新しい REBCO 線材が商品化された。この種の線材を用いれば、高フープ応力耐性と低遮蔽電流性を両立できる可能性がある。この種の線材では、フィラメント間の銅安定化材に流れる結合電流の影響が懸念されてきたが、この影響が明らかになっていない。本研究では多芯 REBCO コイルにおける結合電流の影響と結合時定数を実験的に定量化した。

2. 実験方法

通常の単芯 REBCO 線材と多芯 REBCO 線材(幅 4.0 mm, 厚み 0.094 mm)をそれぞれ 23.3 m 用いて内径 80 mm, 外径 81 mm, 高さ 95 mm の 4 層・92 ターンのレイヤー巻きコイルを作製した(両線材とも SuperPower 製)。臨界電流は単芯 REBCO コイルは 66 A, 多芯 REBCO コイルは 77 A であった(1 μ V/cm 基準)。多芯 REBCO 線材は REBCO 層をレーザースクライブにより 4 分割し、その後 20 μ m 厚の銅メッキを施したものである。すなわち銅安定化材には溝は入っていない。77 K において、励磁速度を変えながらこれらのコイルの中心磁場のヒステリシスを測定した。また、結合電流の時定数を測定するために、励磁後の中心磁場の時間変化を測定した。

3. 実験結果と考察

各コイルの中心磁場の遮蔽電流磁場ヒステリシスを Fig. 1 に示す。中心における遮蔽電流磁場の大きさは、室温で測定した励磁係数から算出した磁場から測定磁場を差し引いたものである。単芯 REBCO コイルのヒステリシスループ(Fig. 1 (a))は励磁速度に依存しないが、多芯 REBCO コイルの場合(Fig. 1(b))は励磁速度が遅くなるにつれ、ヒステリシスループの大きさが小さくなった。すなわち、励磁速度が速い場合(2.67 A/s)は銅安定化材を介した結合電流の影響により単芯 REBCO コイルと同じヒステリシスループを描くが、励磁速度が遅い場合(0.013 A/s)は励磁中に結合電流が減衰するので多芯化による遮蔽電流磁場の低減の効果が得られる。

各コイルを速い励磁速度(3.3 A/s)で 40 A まで通電し、ホールドした後の中心磁場の変化を Fig. 2 に示す。多芯 REBCO コイルの場合、結合電流の減衰により顕著に中心磁場がドリフトしている。結合電流の減衰による中心磁場のドリフトを指数関数でフィッティングすると、時定数は 24 s であった。

ツイストしたフィラメントにおける結合電流の時定数は以下の式で与えられる[2]。

$$\tau = \frac{\mu_0}{2\rho_{ef}} \left(\frac{L}{2\pi}\right)^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_{ef} は安定化材の実効的な抵抗率、 L はフィラメントのツイストピッチ長である。多芯 REBCO 線材はツイストされてい

ないため、線材長さ 23.3 m を $L/2$ として計算すると、 τ は 15000 s とわけて長い時間になる。ところが、実際にはこれより二桁も短い時定数で結合電流が減衰している。すなわち、別の磁気拡散距離により結合時定数が決まっている。このメカニズムを学会で発表する。

4. まとめ

多芯 REBCO コイルにおける結合電流が、よりも 2 桁短いことが明らかとなった。本研究の一部は JST S-イノベ、一部は JSPS 科研費 25289070 によって行われたものである。

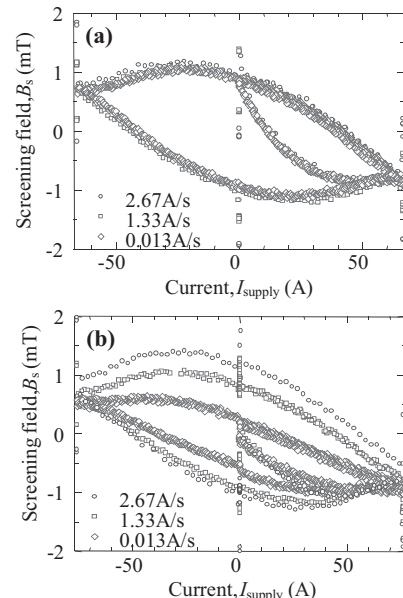


Fig.1 Hysteresis of the screening current-induced central magnetic field in the mono filamentary REBCO coil (a) and multi filamentary REBCO coil (b)

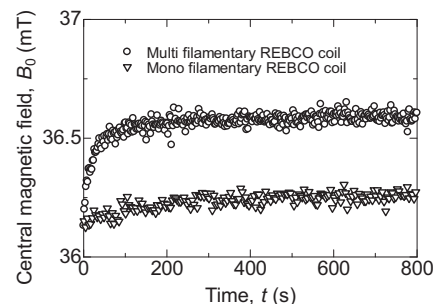


Fig.2 Central magnetic field drift with time in the mono filamentary REBCO coil and multi filamentary REBCO coil after charging to 40 A at the rate of 3.3 A/s

参考文献

- [1] Y. Yanagisawa, et al, IEEE TAS, Vol.25 (2015) 6603705
[2] M. N. Wilson. *Superconducting Magnets*. (1983) p179.

高フープ応力耐性と低遮蔽電流性を両立する HTS コイル技術に向けて(2) ～高強度 Bi-2223 コイルの遮蔽電流の単芯/多芯モード転移～

Towards HTS coil technology with combination of high hoop stress tolerance and small screening current induced field (2)

～ Mono / multi-filament mode transition for a high-strength Bi-2223 conductor coil ～

許 一, 中込 秀樹(千葉大); 井口 聖威也, 高尾 智明(上智大); 濱田 衛(JASTEC); 松本 真治, 西島 元(NIMS); 末松 浩人(JEOL RESONANCE); 柳澤 吉紀, 金 新哲, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研)

XU Yi, NAKAGOME Hideki (Chiba University); IGUCHI Seiya, TAKAO Tomoaki (Sophia University); HAMADA Mamoru (JASTEC); MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); YANAGISAWA Yoshinori, JIN Xinzhe, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN)
E-mail: yi.xu@riken.jp

1. はじめに

NMRなどに必要とされる高磁場かつ高精度磁場のコンパクト磁石を実現するには、300 MPa 以上のフープ応力耐性と低遮蔽電流磁場性を両立する第3世代のHTSコイルが必要である。この観点から、高強度 Bi-2223 線材のコイルは、300 MPa を大きく上回るフープ応力耐性を示すため、有望である。ところが、このコイルは4.2 K 自己磁場中では、特異な遮蔽電流磁場特性を示すことが明らかになった。本報では、この現象のメカニズムを調べ、コンパクト超高磁場 NMR 磁石への適用性を議論する。

2. 実験方法

30 μm 厚の Ni-Cr 補強材を半田で両面に貼ることで補強した Bi-2223 線材(住友電工製 Type HTi-NX)を用いて6レイヤー×21ターンのレイヤー巻コイルを製作した。コイルの内径、外径、高さは、それぞれ119 mm、123 mm、101 mm である。まず、このコイルを77 K で通電し、遮蔽電流磁場を定量化した。次に、コイルをNIMSの17.2 T LTS コイルの4.2 K コールドボアに設置し、LTS コイルの磁場を0 T から17 T の間で変化させながら Bi-2223 コイルの励消磁を行い、遮蔽電流磁場の外部磁場依存性を計測した。Bi-2223 コイルの遮蔽電流磁場は、励磁係数による計算磁場から測定磁場を引くことで算出した。また、遮蔽電流による残留磁場の温度依存性を調べるために、コイルの引き上げ時に残留磁場とコイル温度を測定した。

3. 実験結果

Bi-2223 コイルの77 K 自己磁場通電においては、遮蔽電流磁場は中心磁場の1%程度であった。ところが、4.2 K 自己磁場通電における遮蔽電流磁場は、最大で中心磁場の25%となり、77 K の場合と比べて劇的に大きくなった。その後、外部磁場の設定値を上昇させながら、遮蔽電流磁場の値を計測すると、外部磁場の上昇に応じて、遮蔽電流磁場が小さくなっていった(Fig.1)。特に、外部磁場が1 T 以下の範囲では、遮蔽電流磁場が急激に減少した。

励磁試験後、Bi-2223 コイルをボアから引き上げる段階における、遮蔽電流による残留磁場とコイル温度の関係を Fig.2 に示す。4.2 K から20 K において、残留磁場が急激に減少し、その後は徐々に減少し、 T_c 付近で消失した。

4. 考察

実験結果より、Bi-2223 コイルは、4.2 K 自己磁場中では REBCO コイルと同程度[1]の大きさの遮蔽電流磁場が発生するが、外部磁場をかけることで、これが大幅に小さくなることが明らかとなった。Bi-2223 線材は100本を超えるフィラメントが銀母材に埋め込まれているが、フィラメント同士のブリッジが存在することが指摘されている[2][3]。今回見出された現象は、以下のように解釈することができる。外部磁場が低い場合、マルチフィラメントを結ぶ多数のブリッジによりモノフィラメントとして振る舞い、大きな遮蔽電流磁場を生む。しかし、実はこのブリッジが弱結合[4]であり、磁場が大きくなると超伝導性を失い、

本来のマルチフィラメント状態へと転移する。この説明は、Fig.2 に示す遮蔽電流磁場が低温(< 20 K)領域のみにおいて大きい、という事実とも整合する。

この特性を実用的な観点から考えると、4.2 K の LTS/HTS 磁石においては、Bi-2223 コイルは外層 LTS コイルが発生する数 T 以上の磁場中に置かれるので、マルチフィラメントモードとして振る舞い、遮蔽電流磁場の影響が小さくなるはずである。ただし、将来的な全 HTS 磁石を想定すると、外層部においては経験磁場が低いため、顕著な遮蔽電流が生まれ、問題となる可能性が高い。

5. まとめ

高強度Bi-2223コイルは低温(< 20 K)、低磁場(< 1 T)においては、モノフィラメントモードとして振る舞うが、これを上回る温度・磁場においては、本来のマルチフィラメントモードとして振る舞う。安定・均一な磁場に必要の磁石においては、この特性を考慮することが必要である。本研究はJST S-イノベによって行われたものである。

参考文献

- [1] Y. Yanagisawa, et al.: *IEEE TAS* 20, 744-747 (2010)
- [2] K. Koyama, et al.: *Physica C* 469 694-701 (2009)
- [3] N. Amemiya, et al: *Physica C* 392-396 1083-1090 (2003)
- [4] J. Ekin, *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements* (2006)

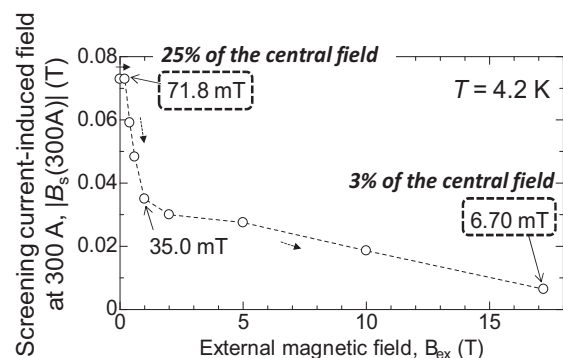


Fig.1 Screening current-induced field vs. external field.

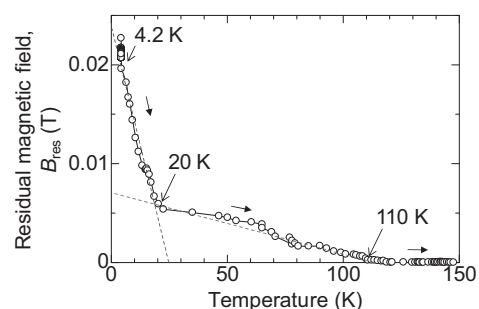


Fig.2 Residual magnetic field vs. coil temperature.

電磁力による応力集中が引き起こす劣化(1) ～エポキシ含侵の不均一性に起因する線材の座屈～

Degradation caused by an electromagnetic force-induced stress concentration (1)

～Buckling of a conductor due to inhomogeneity of the winding～

松田 徹郎, 岡村 哲至(東工大); 濱田 衛(JASTEC); 松本 真治(NIMS); 末松 浩人(JEOL RESONANCE);
柳澤 吉紀, 前田 秀明(理研)

MATSUDA Tetsuro(Tokyo Tech), OKAMURA Tetsuji(Tokyo Tec); HAMADA Mamoru(JASTEC);
MATSUMOTO Shinji (NIMS); SUEMATSU Hiroto(JEOL); YANAGISAWA Yoshinori(RIKEN), MAEDA Hideaki(RIKEN)
E-mail: matsudatetsuro@gmail.com

1. はじめに

REBCO コイルの冷却時の熱応力による剥離・劣化は、この分野の主要課題の一つとして、防止技術が確立されてきた[1]。今回、熱応力による剥離を防ぐことができる手法として報告したポリイミド電着を施したREBCO線材のレイヤー巻コイルをエポキシ含浸し、17 T の外部磁場中で通電したところ、電磁力による劣化が見られた。結果と原因について報告する。

2. 実験方法

47 m の REBCO 線材 (SuperPower 社製 SCS4050) に 10 μ m 厚のポリイミド電着被膜[2]を施した。この線材を、レイヤー巻きし、巻線表面にガラス繊維布を巻き、この上から真鍮バインド線を巻いた。巻線内径/外径/高さはそれぞれ 80 mm/ 81.8 mm/ 94.8 mm、総ターン数は 184 (8 レイヤー \times 23 ターン)。このコイルにエポキシ樹脂 (Emerson & Cuming 社製 Stycast1266) を真空含浸 (100 Pa, 10 分間) し、次いで加圧含浸 (0.05 MPa, 15 分間) して硬化させた。このコイルを液体窒素中、液体ヘリウム中で通電し、さらに 17.2 T LTS コイルの外部磁場中で通電した。この種のコイルでは、電磁力が小さい自己磁場下で特性劣化がなかった。

3. 結果と検討

77 K, 4.2 K の自己磁場において、コイルは健全な特性を示し、熱応力による劣化は見られなかった。次に 17.2 T 中において通電を行った (Fig. 1 参照)。180 A 付近で、常伝導電圧が現れ始め、321 A において熱暴走し電源遮断に至った。再度コイルを通電したところ、直線的な電圧が発生した。試験後、コイル外周のエポキシ層を切削し、分解して内部を観測したところ、エポキシがコイル上下端部数 cm までしか浸透しておらず、また、最外層 (第 8 層) において、コイル軸方向にわたって線材の折れ曲がり[3]が見られた (Fig.2(a)参照)。

熱暴走が起きた箇所を探すために、各層/各ターンに 50 mm 間隔で電圧タップを設け、77 K で通電した。結果的に、最外層の第 12 ターンに顕著な劣化が見られた (Fig.3 参照)。また、隣接する第 11, 13 ターンも劣化していた。第 12 ターンの変形箇所の近くにはポリイミド被膜にガラス繊維布の織り目が転写されていた。これは熱暴走により線材が 300°C を超える温度を経験したためであると推定される。この部分の銅安定化材と銀層をエッチング除去し、REBCO 層の表面を観察したところ、亀裂が生じていた (Fig.2(c)参照)。上記のように、コイル内にはエポキシが十分浸透しておらず、エポキシ樹脂の分布に不均一性があった。特に劣化部では樹脂が上部にむけて山形に突き出ている。このために、この付近の線材に座屈が生じたものと推測できる。

エポキシ含侵が完全に実施できていれば、コイルは一体化されたバルクになるので、この種の座屈は抑制できたはずである。本コイルでは、含侵が不完全であるために線材の個別の動きが生じ座屈に至ったものである。従って、本結果は、ポリイミドコート REBCO 線をエポキシ含侵した場合について知見を与えるものではないが、ポリイミドコート REBCO 線材は表面が平滑でありエポキシが浸透しにくいのは確かである。この意味で、我々は、エポキシの塗りこみ含侵方式の方が良いのではないかと考えており、この種の試験の準備を進めている。この場合には、電磁力によるこの種の座屈は生じないものと推測できる。

4. 結論

電磁力によるREBCOコイル特性の劣化を初めて実証した。

本コイルではフープ応力の増加とともに巻線の一部で座屈が進展し、熱暴走に至った。含侵の不備自体は製作上の問題であるが、今回明らかとなった重要なポイントは、「巻線の拘束状態に不均一性がある状態では、フープ応力が大きくなるにしたがって、本来均一な引張であるフープ応力に偏りが生じ、薄く剛性の低いREBCOテープ線材が座屈を起こし、コイル特性が劣化する」ということである。本研究の一部は、JST S-イノベによって行われたものである。

参考文献

- [1] 柳澤吉紀, 前田秀明: 低温工学48(4/5)p1(2013)
- [2] Y.Yanagisawa et.al. Physica C 476(2012) 19-22
- [3] D. Ma et al., Super. Sci. Tech., 27 (2014) 085014

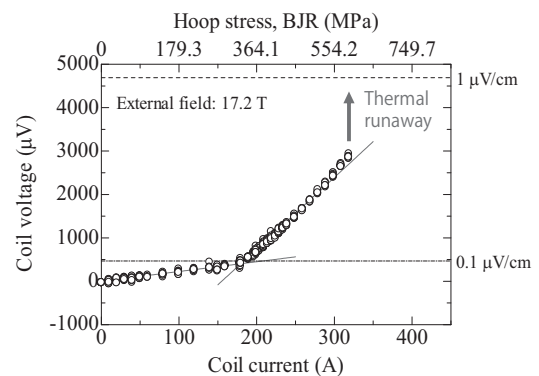


Fig.1 $V-I$ characteristic of the coil at 4.2 K in 17.2 T. Around 200 A, the gradient increased and at 321 A, the voltage abruptly went up.

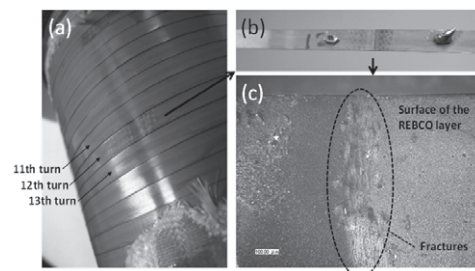


Fig.2 (a) Buckling of the conductor of the outermost 8th layer. (b) 12th turn conductor of the 8th layer. (c) Surface of the REBCO layer of the buckling part.

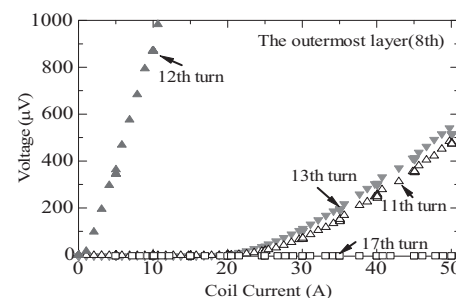


Fig.3 $V-I$ characters between taps near buckling location.

電磁力による応力集中が引き起こす劣化(2)

～接続部への応力集中とコイル最外層におけるエッジワイズ曲げによる座屈～

Degradation caused by an electromagnetic force-induced stress concentration (2)

～Stress concentration on a soldered joint and edgewise bend at the outermost layer～

梶田 健太郎, 井口 聖威也(上智大); 柳澤 吉紀(理研); 許 一; 名和 雅斗(千葉大); 濱田 衛(JASTEC); 高尾 智明(上智大); 中込 秀樹(千葉大); 松本 真治; 西島 元(NIMS); 末松 浩人(JEOL RESONANCE); 高橋 雅人; 前田 秀明(理研)
 KAJITA Kentaro, IGUCHI Seiya (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori (RIKEN); XU Yi; NAWA Masato (Chiba Univ.); HAMADA Mamoru (JASTEC); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); NAKAGOME Hideki (Chiba Univ.); MATSUMOTO Shinji; NISHIJIMA Gen (NIMS); SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE); TAKAHASHI Masato; MAEDA Hideaki (RIKEN)
 E-mail: kentaro.kajita@riken.jp

1. はじめに

1 GHz (23.5 T) の磁場を上回る超高磁場・コンパクト NMR 磁石には、300 MPa を超えるフープ電磁応力に耐えて高磁場を発生させる HTS コイル技術が必要である。本研究では、17.2 T LTS 磁石に REBCO/高強度 Bi-2223 コイルを組み込み、高磁場試験を行った。その結果、フープ応力が強い場合の電磁力による REBCO コイルの劣化が見られたので報告する。

2. 高磁場試験

REBCO コイルと Bi-2223 コイルを作製し(共にレイヤー巻/パラフィンワックス含浸)、NIMS の 17.2 T LTS コイルに組み込み励磁試験を行った (Table 1 参照)。HTS コイルは 11.0 T を発生し、中心磁場 28.2 T (1.2 GHz) を発生するよう設計した。HTS コイル、LTS コイルは別電源により液体ヘリウム浸漬冷却下で励磁した。

まず、HTS (REBCO+Bi-2223 直列) コイルを単体励磁し、劣化なく 13 T を発生した。その後、17.2 T 磁場中で励磁したが、150 A の時点で REBCO コイルに常伝導電圧の発生が見られた (Fig.1○印)。その後、210 A、25.0 T まで励磁したところで励磁を止めた。このときの REBCO コイルにおける最大フープ応力は 205 MPa であった。消磁時には励磁時に比べ線形に電圧が発生しており (Fig.1●印)、電磁力により恒久的な劣化が生じたことが明らかである。

3. 電磁力による応力集中が引き起こす特性劣化

3.1 最外層におけるエッジワイズ曲げによる劣化

高磁場試験後、REBCO コイルのバインダーを外して観察したところ、最外層の線材がコイル軸方向の電磁力により動き、その結果エッジワイズ曲げおよび線材の波打ち変形が生じた。この部分は周辺部分に比べ、 I_c が低下していた。従来の LTS コイルにおいて線材の動きはクエンチにつながるが、HTS コイルは容易にクエンチしないため、線材が変形して永久劣化にまで至ってしまうのである。

3.2 接続部での応力集中による剥離

コイルを巻き戻して診断した。Fig.2 に高磁場試験後のコイル内部の半田ブリッジジョイント部を示す。本線とブリッジ線のそれぞれにてバッファ層と REBCO 層で剥離が見られた。77 K で、この部分の V-I 特性を測定すると、REBCO コイル全体の特性とほぼ一致した。すなわちこれが高磁場試験における劣化の主因である。これは、本来均一であるフープ応力が、ブリッジ接続の端部 (Fig.2 参照) において劈開 (cleavage) モードの応力集中 [1] に転化して剥離を起こし、これが引き剥がし (peeling) モードで進展したのである。REBCO コイルは冷却時にこの種の応力集中モードによって劣化することが広く知られているが [2]、今回、電磁力によっても同種の劣化が起きることがはじめて明らかとなった。

4. まとめ

REBCO コイルは熱応力だけでなく、電磁力によっても劣化することが明らかとなった。本質は (i) REBCO 線材の応力集中

に対する剥離のしやすさと、(ii) 薄いテープであることに起因する動きやすさ・曲がりやすさあり、これらを防ぐことが基本的な方策である。対策については学会にて議論を行う。

本研究は(独)科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」(S-イノベ) の支援によって行われた。

参考文献

- [1] Edward M. Petrie, Handbook of Adhesive and Sealants Second Edition, McGraw-Hill companies, p115
 [2] Takematsui et. al., Physica C, 470, 674-677, 2010

Table 1 Parameters for the REBCO coil, the Bi-2223 coil and the LTS coils for a 28.2 T operation

Parameters	REBCO	Bi-2223	LTS
Coil i.d. / o.d. (mm)	40 / 71.7	81 / 124	135 / 517
Coil height (mm)	210	384	710
Number of turns	3700	4640	-
Number of layers	74	58	-
Operating current (A)	304.9	304.9	241.1
Central field (T)	6.52	4.47	17.2
Maximum B/JR (MPa)	318	241	-

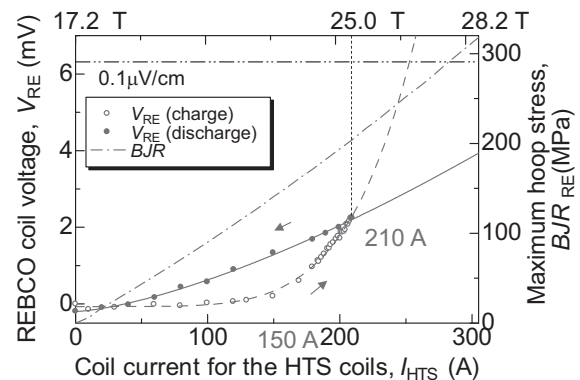


Fig.1 Voltage - current characteristics and maximum hoop stress for the REBCO coil

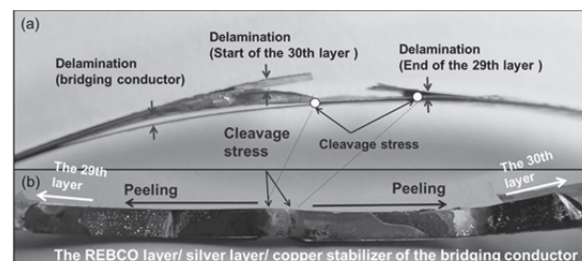


Fig.2 (a) A photograph for a bridge joint in the REBCO coil. (b) The composite of the copper /silver /REBCO layer for the bridging conductor.

超 1GHz NMR の開発(1) プロジェクト総括と強磁場 NMR マグネット展望

Development of beyond 1 GHz NMR system (1)

清水 禎, 端 健二郎, 大木 忍, 後藤 敦, 酒井 修二, 出口 健三, 松本 真治, 野口 隆志, 西島 元(物材機構);
前田 秀明, 柳澤 吉紀, 高橋 雅人, 山崎 俊夫, 井口 聖威也(理研・横浜研究所);
田中良二, 根本貴宏, 末松浩人, 西山祐介(JEOL RESONANCE Inc.);
三木 孝史, 齊藤 一功(神戸製鋼所)

SHIMIZU Tadashi, HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, GOTO Atsushi, SAKAI Shuji, DEGUCHI Kenzo, MATSUMOTO Shinji,
NOGUCHI Takashi, NISHIJIMA Gen (NIMS); MAEDA Hideaki, YANAGISAWA Yoshinori, TAKAHASHI Masato,
YAMAZAKI Toshio, NISHIYAMA Yusuke, IGUCHI Seiya (RIKEN); TANAKA Ryoji, NEMOTO Takahiro,
SUEMATSU Hiroto (JEOL RESONANCE Inc.); MIKI Takashi, SAITO Kazuyoshi (KOBE STEEL Ltd.)
E-mail: shimizu.tadashi@nims.go.jp

1. はじめに

NMR は物質の分子構造、原子の結合状態や運動状態などを調べる事ができる分析装置です。今までに普及している代表的応用例は医薬品や食品における分析業務やタンパク質などの有機化合物の研究開発です。現状の NMR は感度と分解能の点でまだ不十分であり、大きい改善の余地を残しています。NMR の感度と分解能が向上すれば、従来は分析困難だった複雑な構造を持つ生体物質や無機物を含む各種材料などが詳細に分析できるようになり、優れた医薬品や革新的材料の開発につながります。NMR の感度と分解能は磁場が高ければ高いほど向上するので、磁場は感度と分解能の両方を一度に改善させる事が出来る最も有力な方法です。

従来の NMR 磁石は金属系超伝導体で作った線材を多層コイル構造に巻いて作られています。現在実用化されている金属系超伝導体には2種類があり、NbTi という合金系の超伝導体と、Nb₃Sn という化合物系の超伝導体です。NbTi の特徴は、出せる磁場は低いが高価であること、Nb₃Sn の特徴は出せる磁場は高いが高価であることです。磁場強度が 400MHz (9T) 以下の NMR 磁石は NbTi だけを使って作られており、500MHz (11T) 以上の磁石は、コイル外層(磁場強度が弱い)部分に NbTi を用い、コイル内層部分(磁場が強い)に Nb₃Sn を使って作られています。また、MRI の磁場強度は1~4T なので、NbTi だけを使って作られています。

これらの金属系超伝導体は到達できる最高磁場に技術的な限界があります。900MHz(21T)を超えたあたりから限界領域に入ってきて、1000MHz(23T)が上限であると考えられています。実際、NIMS と神戸製鋼が開発した 920MHz (2001 年)と 930MHz(2004 年)およびドイツが開発した 1000MHz (2009 年)などが金属系超伝導体の限界領域に到達した開発例です。

この 1000MHz という磁場限界を超えるには、HTS を用いることが唯一の解決方法であることが当初から分かっていました。HTS を用いれば 1500MHz(35T)も不可能ではないと考えられています。実際には HTS 発見(1986 年)から 20 年以上が経っても世界中で誰も実現できずにいました。

2. 開発の内容

HTS を用いて NMR 磁石を作るには HTS に特有の様々な技術的困難がありました。例えば、HTS はセラミックの一種なので割れやすい性質があります。厚み約 5mm で総延長約 3km の HTS 線材を直径約 10cm 長さ約 1m のコイル状に巻くには特殊な巻線技術を開発する必要がありました。また、HTS は従来の金属系超伝導体と違って超伝導接続⁽³⁾の技術が未開発のため永久電流⁽⁴⁾による運転が出来ないので、磁石には常に電源から電流を流し続ける必要があります。NMR は磁場の変動があると測定できないので特別に安定度の高い電源と磁場安定化装置を開発する必要がありました。様々な試行錯誤の結果、HTS を用いた世界最高磁場の NMR 磁石の開発および 1020MHz の NMR 測定⁽¹⁾に成功しました。

NMR は高磁場になればなるほど感度と分解能が向上します。実際 1020MHzNMR 装置で測定したデータは従来よりも性能が向上していることが確認できました。

今回開発に用いた HTS 線材は Bi 系超伝導体の一種である Bi2223 と呼ばれる超伝導線です。Bi 系超伝導体は NIMS の(故)前田弘氏(1936-2014)が世界に先駆けて 1988 年に開発した HTS の一種で、今日では住友電気工業株式会社が製品化に成功しています。今まで HTS は応用先の目処が立っていませんでしたが今回の成功により NMR の高磁場化に応用できる道が切り拓かれたこととなります。

3. まとめ

今後は、HTS を用いた高磁場 NMR 磁石の開発が加速すると思われます。強磁場 NMR 開発では日米欧が開発競争をしていますが、すでに欧州では 4 カ国の政府において 1200MHz の NMR を開発するための予算が承認されています。いずれも HTS を用いた磁石を新規開発する内容であり、1 台当たり約 20 億円の予算が承認されています。米国でも 1200MHz 次世代 NMR 開発の提案が全米科学アカデミーから政府に対して答申されています。

日本も含めいずれの国においても、このような高磁場 NMR は広く普及する市販品を目指して開発するというよりも、国内に1台~数台を設置して共用装置として運営することを想定しています。すでに文科省ではナノテクノロジープラットフォーム事業(中核機関は NIMS)や NMR プラットフォーム事業(中核機関は理研)などにより NMR の共用設備を運営してきており、今後さらに最先端の装置が共用装置として加わることになれば、利用促進の観点からも非常に有意義です。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラム「超1GHz-NMRシステムの開発」の一環として実施されました。

参考文献

1. K. Hashi et al.: J. Mag. Res. vol. 256 (2015), p. 30.
K. Hashi, et al., submitted to Chem.Lett., 2015.
2. G. Nishijima et al., presented at MT-24, Seoul, Korea.
G. Nishijima et al., presented at EUCAS 2015, Lyon, France.
3. T. Kiyoshi et al.: IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 18 (2008), p. 860.
4. T. Kiyoshi et al.: IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 21 (2011), p. 2110.

超 1GHz NMR の開発(2) Bi-2223内層コイルを含むマグネットの励磁

Development of beyond 1 GHz NMR spectrometer (2)

– Excitation of the superconducting magnet including Bi-2223 innermost coil –

西島 元, 松本 真治, 端 健二郎, 大木 忍, 後藤 敦, 野口 隆志, 酒井 修二, 清水 禎 (NIMS);
柳澤 吉紀, 高橋 雅人, 前田 秀明 (理研); 三木 孝史, 齊藤 一功 (神戸製鋼)

NISHIJIMA Gen, MATSUMOTO Shinji, HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, GOTO Atsushi, NOGUCHI Takashi, SAKAI Shuji,
SHIMIZU Tadashi (NIMS); YANAGISAWA Yoshinori, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN);
MIKI Takashi, SAITO Kazuyoshi (Kobe Steel)
E-mail: nishijima.gen@nims.go.jp

1. はじめに

「超 1GHz NMR システムの開発」は、920 MHz (21.6 T) NMR システムのアップグレードプロジェクトとして 2006 年に開始された[1]。このプロジェクトでは 920 MHz NMR 超伝導マグネットの最内層 Nb₃Sn コイルを Bi-2223 コイルに入れ替えることで 1 GHz (23.5 T) 以上で運転する NMR システムを開発してきた。2011 年 3 月の東日本大震災被害からの復旧に 2 年を費やし、2013 年度には 2 度にわたり初期冷却に失敗したが、2014 年 6 月 20 日より開始した初期冷却では 7 月 31 日に超流動ヘリウム温度に到達した。2014 年 8 月 4 日より 7 日にかけて試験励消磁を行った後、8 月 26 日より本励磁を開始し、10 月 17 日に 24.0 T に到達した。半年間の 1020 MHz NMR マグネットとしての運転後、2015 年 4 月 14 日に 24.2 T 発生にも成功した。24.2 T は実用超伝導マグネットによる発生磁場としては世界最高記録である。

本報告ではマグネットの励磁による He II バス温度およびコイル電圧測定結果を報告する。

2. マグネット諸元および Bi-2223 内層コイル諸元

マグネット諸元[2]および内層コイル諸元[3]を Table 1 および 2 に示す。920 MHz NMR マグネットの最内層 Nb₃Sn コイルを Bi-2223 コイルに入れ替え (Bi-2223 コイルは他コイルと直列接続)、運転電流 244.4 A で中心磁場 24.2 T (1030 MHz) の設計 (コイル定数 99.0 mT/A) であったが、今回 NMR 測定によってコイル定数を求めた結果、99.7 mT/A に修正された。

3. 初期冷却および励磁

初期冷却には液体窒素 10,000 L、液体ヘリウム 6,500 L を要した。励磁には電源の電圧 3 V と小さかったことと、慎重を期したために約 1 ヶ月を要した。

Fig. 1 に 2014 年 8 月以降の運転電流 (磁場) と He II バス温度変化を示す。励磁前に 1.57 K まで冷却できていたが、1020 MHz 運転中は 1.72 K であった。He II バスへの熱侵入は全体で 3.1 W と見積もられ、この大きな熱侵入が運転温度上昇に与えた影響は大きい。マグネット運転の詳細について当日報告する。

謝辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の支援によって行われた。

参考文献

- [1] T. Kiyoshi *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **18** (2008) 860.
[2] G. Nishijima *et al.*, presented at MT-24, Seoul, Korea.

[3] G. Nishijima *et al.*, presented at EUCAS 2015, Lyon, France.

Table 1 Main Parameters of 920 MHz and 1020 MHz NMR Magnets

	920 MHz	1020 MHz
Room temperature (RT) bore diameter [mm]	54	←
Cold bore diameter [mm]	74	←
Maximum outer diameter of windings [mm]	909.2	←
Maximum height of windings [mm]	1520	←
Inductance [H]	1123	1155
Operating current (I_{op}) [A]	244.2	240.5 ^a
Central magnetic field (B_0) [T]	21.62	24.0
Stored energy [MJ]	33	33
Operating temperature (T_{op}) [K]	1.55	1.72
Operation mode	PC ^b	PS ^c driven

^a I_{op} was determined by ²D NMR measurement to verify magnetic field value precisely.

^b Persistent current.

^c Power supply.

Table 2 Innermost Coil Parameters for 920 MHz and 1020 MHz NMR Magnets

	920 MHz	1020 MHz
Superconductor	Nb ₃ Sn	Bi-2223
Lamination material	n/a	Cu-Sn
Conductor size [mm]	3.5×1.75	4.45×0.36
Insulation material	Glass yarn	Polyimide tapes
Inner diameter [mm]	78.4	78.4
Outer diameter [mm]	124.3	124.0
Height [mm]	599.1	840.0
Number of turns	1,953	10,094
Contribution field [T]	1.0	3.6

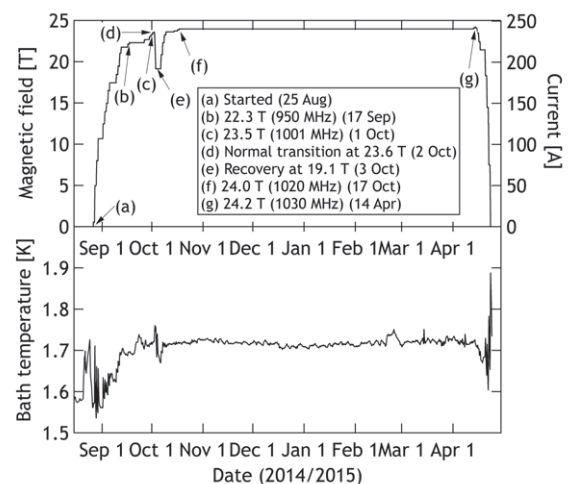


Fig. 1 Magnetic field and He II bath temperature as a function of date for 1020 MHz NMR magnet.

超 1GHz NMR の開発(3) 電源駆動モード運転 NMR 磁石の停電対策

Development of beyond 1 GHz NMR system (3)

-Countermeasures for power outage in operation of driven-mode NMR magnet-

松本 真治, 木吉 司, 西島 元, 端 健二郎(物材機構); 高橋 雅人(理研); 野口 隆志, 大木 忍(物材機構);
前田 秀明(理研); 清水 禎(物材機構)

MATSUMOTO Shinji, KIYOSHI Tsukasa, NISHIJIMA Gen, HASHI Kenjiro (NIMS); TAKAHASHI Masato (RIKEN);
NOGUCHI Takashi, OHKI Shinobu (NIMS); MAEDA Hideaki (RIKEN); SHIMIZU Tadashi (NIMS)
E-mail: MATSUMOTO.Shinji@nims.go.jp

1. はじめに

1.02 GHz 核磁気共鳴(NMR)装置は, 約半年間にわたる直流磁石用電源駆動モードでの運転を完了した [1,2]. 1.02 GHz NMR 磁石は, Bi-2223 高温超伝導(HTS)最内層コイルと低温超伝導(LTS)コイルからなる [3,4]. HTS コイルを組み込んだ磁石の運転には, 一般的なNMR磁石での永久電流モード運転とは異なり, 直流高安定度磁石用電源による, 電源駆動モード運転が採用された. 磁石用電源は間断なくコイルに電流を供給することが求められ, 停電時に電流の供給を止めることができないため, 停電対策が施された.

2. 停電対策

高分解能 NMR 測定を行うため, 1.02 GHz NMR 磁石の主コイルへの電流供給は, 直流高安定度磁石用電源(1.2 ppm/8hours)により行われた. 停電時に, 磁石用電源がコイルへの電流供給を停止することがないように, 非常用発電機と瞬時電圧低下補償装置を準備した. 商用電力(通常時)または非常用発電機電力(停電時)は, 瞬時電圧低下補償装置を通して, 磁石用電源に供給された. 主コイルには, 磁石用電源の異常時に, コイル電流を一時的に迂回させるための安全スイッチ, クエンチ保護回路が備えられている. 磁石には, 永久電流モードで運転される, 磁場補正用超伝導シムコイルが含まれる. 各装置の関係は, Fig. 1 に示す.

停電発生後15秒間は, 蓄電池を備えた瞬時電圧低下補償装置が電力を供給し, その後, 非常用発電機が電力を供給する. 非常用発電機が電力供給を開始するまでには, 停電後, 10秒の時間を要する. 理想的には, 停電時, 電力供給が瞬時電圧低下補償装置から非常用発電機へとリレーされ, 磁石用電源は, 間断なくコイルに電流を供給できる設計である. 万一, 瞬時電圧低下補償装置または非常用発電機が正常に作動しない場合, 磁石用電源によるコイルへの電流供給が遮断される. そのような場合, 安全スイッチを閉じ, コイル電流を一時的に迂回させる. コイル電流(主コイルの磁場)は, 迂回路内の抵抗により減衰するため, 超伝導シムコイル内には, 誘導電流が生じる. よって, 超伝導シムコイル電流が臨界電流に達する前に, 磁石用電源を再起動させ, 主コイルの電流を制御しなければならない.

3. まとめ

1.02 GHz NMR 装置による, 高分解能 NMR 測定中には, 幸い, 停電は発生しなかった. 測定終了後, 減磁中に起こった, 落雷による停電において, 瞬時低電圧補償装置に過電流の不具合が発生し, 磁石用電源によるコイルへの電流供給が遮断された. 安全スイッチを閉じ, 一時的にコイル電流を迂回させることで, クエンチ保護回路を作動させることなく, 再び, 磁石用電源でコイル電流を制御することができた.

謝辞

本研究は, 国立研究開発法人科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラム「超1GHz-NMRシステムの開

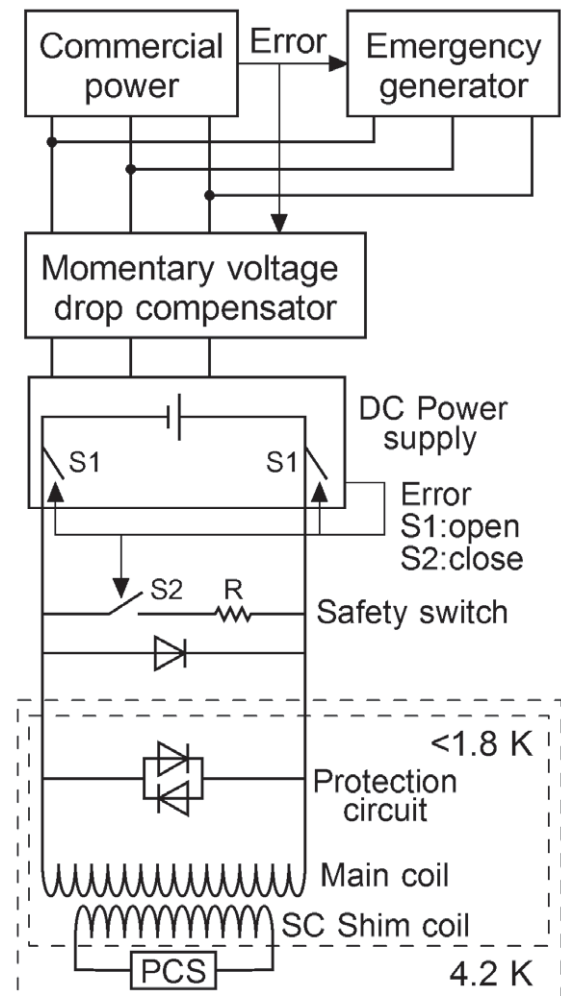


Fig.1 Diagram of a power for a dc power supply through a momentary voltage drop compensator.

発」の一環として実施された. NMRシステムの開発は, 株式会社神戸製鋼所および日本電子株式会社と共同で実施され, 磁石の運転に際し, 国立研究開発法人物質・材料研究機構強磁場ステーションに協力いただいた.

参考文献

1. K. Hashi et al.: J. Mag. Res. vol. 256 (2015), p. 30.
2. G. Nishijima et al.: to be published.
3. T. Kiyoshi et al.: IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 18 (2008), p. 860.
4. T. Kiyoshi et al.: IEEE Trans. Appl. Superconduct., vol. 21 (2011), p. 2110.

超 1GHz NMR の開発(4) He II 冷却システムと冷却事例

Development of beyond 1 GHz NMR system (4)

-Superfluid helium cooling system and some of the typical cooling case-

野口 隆志, 端 健二郎, 大木 忍, 酒井 修二, 後藤 敦, 西島 元, 松本 真治, 清水 禎 (NIMS)

NOGUCHI Takashi, HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, SAKAI Syuji, GOTOU Atsushi

MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen, SHIMIZU Tadashi (NIMS)

E-mail: NOGUCHI.Takashi@nims.go.jp

1. はじめに

超 1GHz NMR システム稼動中、加圧超流動ヘリウム冷却で用いた超流動ヘリウム(He II)冷凍システムは、2001 年の 920MHz NMR 完成時に備えられていたものを用いた[1]。今回の冷却運転は、新たな装置の開発は加えずにスタートした。しかし途中、排気装置の増設などいくつかの改良は施したので、既設の冷却システムと改造の概要を示し、2014 年 8 月～2015 年 4 月までの、He II 冷却運転の中で経験したいくつかの特徴ある He II 冷却運転事例を報告する。

2. 加圧超流動ヘリウム冷凍システムの概要

図 1. に He II 冷却器と排気ポンプ配置とフローを示す。また冷却系の初期 2001 年と今回の違いは以下となる。

定格 Bath 温度 : 1.545K +/- 5 mK [2001 年]
 JT 排気ポンプ : 排気量 5000 L/min 1 台 * 予備 1 台
 定格排気流量 : 10 std.L/min. ⇒ 30 mg/sec. 700 mW
 定格 Bath 温度 : 1.72K +/- 10 mK [2014 年]
 JT 排気ポンプ : 排気量 5000 L/min 3 台 * 予備 なし
 定格排気流量 : 45 std.L/min. ⇒ 135 mg/sec. 3030 mW
 このシステムの運転のための主な観測点は以下となる。

- A) ヘリウム吸い込み口温度 B) JT 膨張前温度
 C) 主熱交入り口温度 D) 主熱交出口温度
 E) 排気配管圧力 F) 排気ポンプ出口流量
 G) 加圧超流動槽上部温度

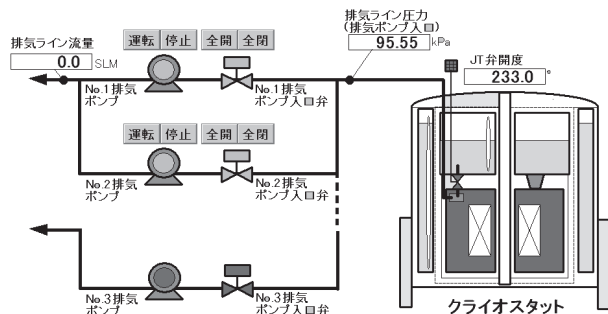


図1. He II 冷却器と排気ポンプ

実際には図2. に示すように、多数の部位を測定しているが、上記(A)から(G)の測定点は、状態診断に用いられた主なものを示した。2001 年の初期状態では、これらの計測と同時に、逐次冷却量と冷却負荷変動を計算し、PC 画面にその結果を示す機能も含まれていたが、震災復旧時に不具合の発生した可能性のある計測点が含まれ、今回は、同時計算はできなかった。それ故、自動制御もできずほとんど手動運転した。

3. 冷却に関係する特徴あるイベント

通電前の He II Bath へのバックグラウンド熱侵入量は、2001 年初期の 700mW より約 500mW 多い 1200mW であった。

安定な常伝導抵抗の突然の発生

発生した安定な常伝導抵抗の、超伝導転移を促すため、通電電流引き下げ、手動の最大冷却を行った。この常伝導抵抗の発生は、まず Bath 温度モニターで確認され、励磁停止を行った。超伝導への再転位の確認はコイルセクション電圧モニターで行われ、ペンレコーダーでも確認できた。

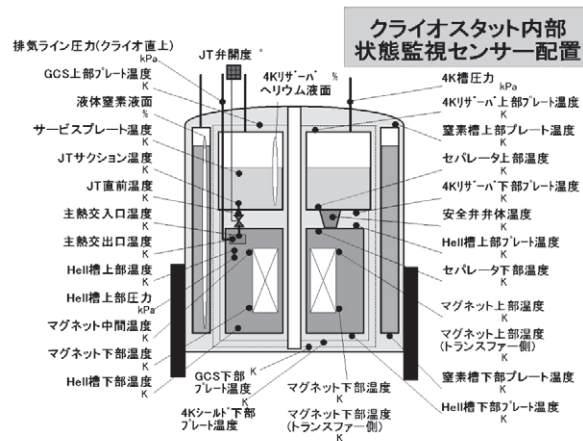


図2. クライオスタット内測定点

排気ポンプの増設

既に待機排気ポンプ No.2 も常時稼動させていたが、HTS コイルの接続抵抗によるオーミックな発熱、予期せぬ Sec.1 の発熱、140A 通電以降に発熱を開始した Sec.4 の発熱、および突然発生する可能性のある S/N 転移の懸念から、定格電流付近で冷却運転が破綻する可能性が出てきたため、3 台目の排気ポンプ No.3 を増設し、3 倍の排気量を確保した。

消磁初期に発生した落雷停電からの復帰

停電と同時に排気ポンプ入り口電磁弁が閉まり、停電前の JT 開度はそのままなので主熱交換器内は超流動ヘリウムでいっぱいになる。それが 4K 槽にまで成長すると 4K 槽から He II Bath への熱侵入量が増大し、Bath 温度が上昇する。本システムでは本来は、自家発電機へ電源が切り替わると自動的に主熱交内を排気する制御プログラムが動作するので、人は状態診断のみ行えば良かったが、No.3 ポンプはその制御外にあり、今回は完全手動で復旧させる必要があった。

4. まとめ

10 数年前に完成した加圧超流動ヘリウム冷却システムの概要と、今回加えた改造および運転諸条件と運転モニターに現れた特徴的な挙動について報告した。排気ポンプを増設し、運転温度を若干上げることで破綻を回避し、解析に用いる精度の高い測定ができなくとも、状態把握のための運転用モニターとしては十分機能することを確認した。

謝辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラム「超 1GHz-NMR システムの開発」の一環として実施された。なおヘリウムの滞りない回収と再液化について、物質・材料研究機構強磁場ステーションの液化室の方々にも多大なご協力をいただいた。

参考文献

- [1] S. Ito et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 14, no. 2, pp. 1715-1718, 2004.

超 1 GHz NMR の開発(5) 1020 MHz NMR マグネットの磁場補正

Development of a beyond 1 GHz NMR spectrometer (5)

- Shimming for the 1020 MHz NMR magnet

井口 聖威也, 高尾 智明(上智大); 柳澤 吉紀, 高橋 雅人, 前田 秀明(理研); 端 健二郎, 大木 忍, 松本 真治, 西島 元, 野口 隆志(NIMS); 末松 浩人, 田中 良二(JEOL RESONANCE); 斉藤 一功(神戸製鋼); 清水 禎(NIMS); IGUCHI Seiya, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); YANAGISAWA Yoshinori, TAKAHASHI Masato, MAEDA Hideaki (RIKEN); HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, MATSUMOTO Shinji, NISHIJIMA Gen, NOGUCHI Takashi (NIMS); SUEMATSU Hiroto, TANAKA Ryoji (JEOL RESONANCE); SAITO Kazuyoshi (Kobe Steel); SHIMIZU Tadashi (NIMS)
E-mail: seiya.iguchi@riken.jp

1. はじめに

内層に HTS コイルが設置されているタイプの磁石には, (i)HTS ソレノイドコイルの非対称な形状や遮蔽電流磁場起因する大きな磁場不均一成分の発生, (ii)HTS コイルの遮蔽電流による磁場補正用の超伝導シムコイルの性能劣化, という問題がある[1]。そのため, NMR に必要な磁場均一度 (<1 ppb) を達成するためには, 超伝導シムコイルで補正できないレベルの磁場不均一性を補正できる鉄シム技術が新たに必要になる。本報では, 超 1 GHz NMR における, 鉄シム技術を適用した磁場補正の結果を報告する。

2. 磁石励磁後の磁場分布

1020 MHz (24.0 T) 励磁後, 磁場マッピングシステムを用いて半径 8.5 mm, 回転ピッチ 2.5 mm, 軸方向距離 36 mm の螺旋状の磁場分布を測定し, ル・ジャンドル関数展開することで磁場均一度を評価した。

920 MHz NMR 磁石と, 1020 MHz アップグレード後の磁石の励磁直後の磁場分布を Fig.1 に示す。Nb₃Sn 最内層コイルが設置された 920 MHz NMR 磁石 (●) に比べ, Bi-2223 最内層コイルが設置された 1020 MHz NMR 磁石 (△) は, Bi-2223 内層コイル起因する大きなラジアル不均一成分を発生した。とりわけ, ZX/ZY 成分はアップグレード前の約 15 倍に相当する 5564 Hz/cm² (5.5 ppm/cm²) 発生した。これは, 外層の超伝導シムコイルの補正能力の約 3 倍の大きさである。そのため, 従来の超伝導シムコイルと室温シムコイルの組合せでは補正不可能, という大きな壁に突き当たった。

3. 磁場均一度補正

大きな不均一成分を補正するため, 別プロジェクトで開発した鉄シム技術[2]を適用した。鉄シムは MRI では広く使用されているが, 従来, NMR で磁場補正を行うためには使われていない。NMR での鉄シム技術は (1) オンデマンドな設計, (2) 励磁状態でアクティブシムのように素早い調整(変更)が可能, (3) 高い空間効率, という利点を持つ[2]。

鉄シムは室温シムコイルの外層に張り付けられ, 室温ボア内に設置される。鉄シムは Fig.2(b)に示すように, (i), (ii)鉄シートのラジアルシム, (iii)ニッケル線のアキシャルシム, (iv)鉄線のラジアルシム, で構成される。これらは磁石が励磁状態のまま磁石下から挿入されるため, 挿入時に電磁力を受ける。しかし, 今回使用した鉄シムが受けた力は, 計算で約 3 kgf であり, 問題にはならなかった。

鉄シム補正後, 超伝導シムコイルで低次成分 (Z1, X, Y, ZX, ZY) を微調整し, 室温シムコイルで残る全ての成分の補正を行った。しかし, 鉄シムの副作用[2]により発生した Z4Y 成分が -261 Hz/cm² 残る等, 一部の高次成分が残留した。最終的に, 磁石中心から ±5 mm において 399 Hz (0.4 ppm) の均一度を達成した (Fig.3 参照)。

その後, NMR 信号を見ながら更に室温シムコイルを調整した結果, <1 ppb の磁場均一度 (分解能) を実現した[3]。

4. まとめ

- 1020 MHz において, Bi-2223 内層コイルに起因する大きなラジアル成分が発生した。超伝導シムコイルの能力の約 3 倍の大きさであり, 従来技術では補正できない。
- これらの磁場成分を, 鉄シムにより補正した。
- いくつかの高次成分が残留した。これを補正するためには, 鉄シム設計の最適化や, 室温シムコイルの補正能力強化が必要になる。
- 今後の超 1 GHz NMR の開発において, 鉄シム技術は必要不可欠な技術になるであろう。

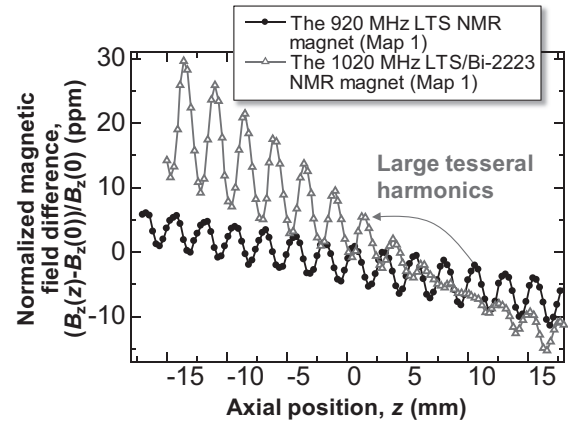


Fig.1 Initial magnetic field distributions for the previous 920 MHz LTS NMR magnet (Z1 SC shim coil is operated at 2 A) and the present 1020 MHz LTS/Bi-2223 NMR magnet

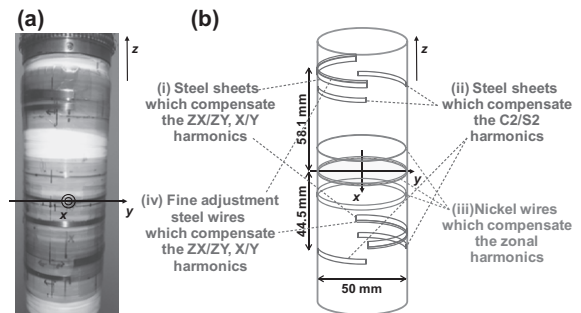


Fig.2 (a) The ferromagnetic shim stacked on the surface of the RT shim coil unit, and (b) schematic drawing of the ferromagnetic shim

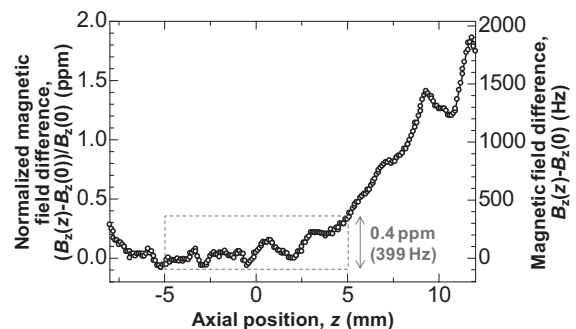


Fig.3 Magnetic field distribution after the shimming operation

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の研究開発事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」(SENTAN)の支援によって行われた。

参考文献

- Y. Yanagisawa, et al.: *J. Magn. Reson.*, Vol. 249 (2014) pp.38-48
- S. Iguchi, et al.: submitted to *Supercond. Sci. Technol.*
- K. Hashi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 92, 1B-p06 (2015)

超 1GHz NMR の開発(6) NMR による 1020 MHz NMR マグネットの評価

Development of beyond 1 GHz NMR system (6)

- Evaluation of the magnet by NMR -

端 健二郎, 大木 忍, 後藤 敦, 清水 禎(NIMS)

HASHI Kenjiro, OHKI Shinobu, GOTO Atsushi, SHIMIZU Tadashi (NIMS)

E-mail: HASHI.Kenjiro@nims.go.jp

1. はじめに

通常のNMR磁石は永久電流モードで運転されているが、今回開発した 1020MHzNMR磁石は電源駆動モードで運転がなされた。そのため、電源の安定度がそのまま磁場の安定度に直結する。NMR測定のためには信号を長時間に渡って積算することが必要であり、磁場の時間的安定性は積算を行う上で重要な要素である。電源の安定度のみではNMR測定に十分な時間的安定度は得られないが、NMR分光計に備わっているロックを用いることによって、NMR測定に必要な長時間に渡って安定した磁場を得ることができる。空間的均一度はシムによって調整された。NMR測定に必要な空間的均一度および時間的安定度が得られているかを調べるために標準物質のNMR測定を行った[1]。

2. 空間的均一度

空間的均一度は超伝導シム、鉄シム、室温シムによって調整され、調整した結果はシムロボットによる磁場プロファイルによって評価されてきた。今回は、実際にNMRスペクトルを取得することによって、均一度の確認を行った。Fig.1 に重水素化したアセトンで1%に希釈したクロロホルムを 1020MHzNMR磁石で測定した $^1\text{H-NMR}$ スペクトルを示す。半値全幅は 0.7ppb であり、良い空間的均一度が得られていることがNMRスペクトルからも確認することができた。

3. 時間的安定度

前述のとおり今回開発した1020MHzNMR磁石は電源駆動モードで運転が行われたため磁場の時間的安定度は電源の安定度に強く依存する。電源の安定度は電源本体のドリフトに加え、電源の冷却水温度や室温などの変化によっても影響を受ける。Fig.2 にNMRロックを用いないときの磁場の時間的変化を示す。重水の重水素核の共鳴周波数から磁場を割り出し、その磁場の変化を経過時間に対してプロットしてある。70時間にわたって ± 0.7 ppm程度の磁場の変動があることがわかる。このままではNMR信号を積算することができないためNMRロックを適用した。NMRロックは標準物質のNMR信号から磁場を割り出し、磁場の変動がないように室温シムのZ0成分にフィードバックを行うものである。

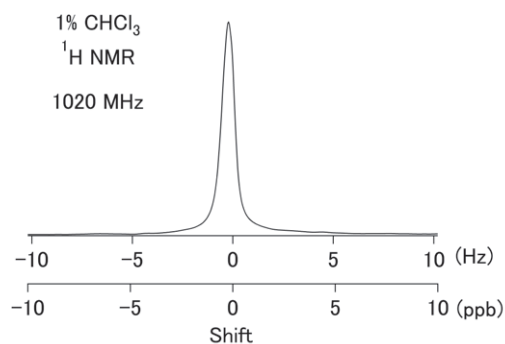
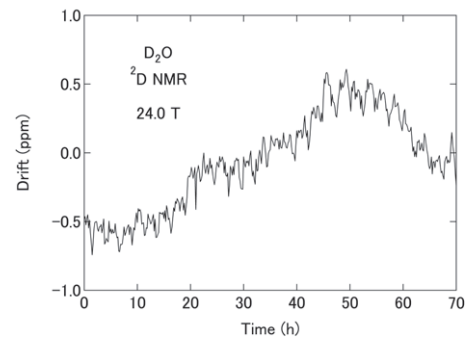
Fig.1 ^1H NMR spectrum of CHCl_3 in acetone- d_6 

Fig.2 Long term drift of the 1020MHz NMR magnet without NMR lock for 70 h.

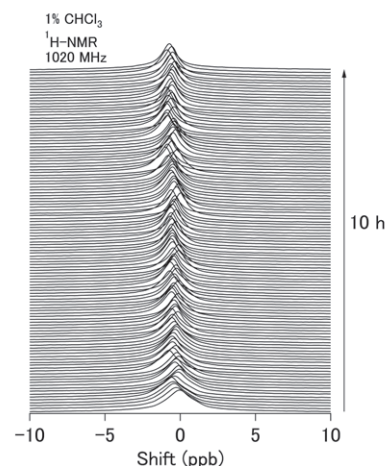
Fig.3 Stability of a shingle shot ^1H spectrum of CHCl_3 with NMR lock for 10 h.

Fig.3 にNMRロックを適用した時のクロロホルムの $^1\text{H-NMR}$ スペクトルの時間変化を示す。10時間にわたって変動が ± 1 ppb の範囲に入っていることが分かる。

4. まとめ

一般に固体高分解能NMR測定を行うため必要な分解能と安定度は 0.1ppm 以下というのが1つの目安になる。今回のNMR測定によって 1020MHzNMR磁石はこれらの条件を満たしており、NMR磁石として十分な性能を持つことが明らかとなった。

謝辞

本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構先端計測分析技術・機器開発プログラム「超 1GHz-NMR システムの開発」の一環として実施された。

参考文献

1. K. Hashi, et al. : Journal of Magnetic Resonance, Vol. 256 (2015) p.33

超 1GHz NMR の開発(7)

膜タンパク質の固体 NMR における高磁場の効果

Development of a beyond 1 GHz NMR spectrometer (7)

- Effect of high magnetic field on solid-state NMR of membrane proteins

山崎 俊夫, 前田 秀明(理研); 端 健二郎, 出口 建三, 清水 禎(NIMS)

YAMAZAKI Toshio, MAEDA Hideaki (RIKEN); HASHI Kenjiro, DEGUCHI Kenzo, SHIMIZU Tadashi (NIMS)

E-mail: maeda@jota.gsc.riken.jp

1. はじめに

近年、膜タンパク質を固体 NMR で解析する例が増えつつある。高磁場化によって、感度と分解能が改善したことが起点となって、多次元 NMR 法の開発が進み、タンパク質分子内の多数の原子からの情報を一気に測定できるようになったからだ。固体 NMR の利点は、多様な試料状態でも測定ができることである。特に膜タンパク質では、脂質 2 重膜中に再構成した状態で測定でき、自然な状態に近いことで、膜構造が再現できていない結晶解析に対しても新しい情報を提供することができる。ただ、多様な試料状態で測定ができるが、状態に依存して分解能も多様である。分解能が高ければ、より多くの構造情報が得られ、構造決定に至れる場合もある。

現在のハイエンド NMR 装置を使っても、最も重要な 7 回膜貫通型の膜タンパク質 GPCR の測定などには、machine time を数か月独占するような状況である。それ故、感度と分解能については、まだまだ向上が望まれている。HTS (high temperature superconductivity) NMR 磁石は、水素核共鳴周波数 1 GHz を超え、はるか高い磁場の可能性を秘めている。まさに、膜タンパク質などの研究ニーズに答える技術である。

今回、膜タンパク質について、1020 MHz NMR による NMR 計測を行い、既存の 700 MHz NMR (永久電流) による結果と比較した。結果は、高磁場の有効性を強く明示するものであるので、報告する。

本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の支援によって行われた。

2. 実験方法

1020 MHz で高分解能固体測定が可能であり、磁場の効果が有効に働くことを証明するために、膜タンパク質で固体 NMR の測定を行った。この種の非溶液試料を用いた固体 NMR 計測では、試料を磁場から 54.7° 傾いた軸の周りに高速 (>10 kHz) で回しながら NMR 信号を計測する。これを MAS (マジック角試料回転) と呼ぶ。ここでは、直径 2.5mm のサンプル管を使う MAS C{H} 2 重共鳴プローブ (水素核と炭素核を計測するプローブ) を使用した。HTS コイルを使うため、外部電源をつないだままのため、電源の不安定性が磁場の不安定化をもたらす。この問題を解決するために、磁場を 10 ppb レベルで安定化できる回路 (外部ロック回路) を固体プローブに取り付けた。これは、重水 (D₂O) を封入した管に外部ロックに用いるマイクロコイルをつけたものである。このコイルからの信号を溶液用の通常のロックシステムに導き、磁場を安定化した。磁場補正シム (磁場均一化) について測定試料内の水信号をみながら最適化し、均一な磁場を得た。

測定分子は、2 重膜に再構成した水チャンネル膜タンパク質 (アクアポリン Z, 231 アミノ酸残基) である。約 10mg の試料中 1/4 程度がそれ以下がタンパク質である。タンパク質のみ安定同位体 ¹⁵N, ¹³C に置き換えてある (均

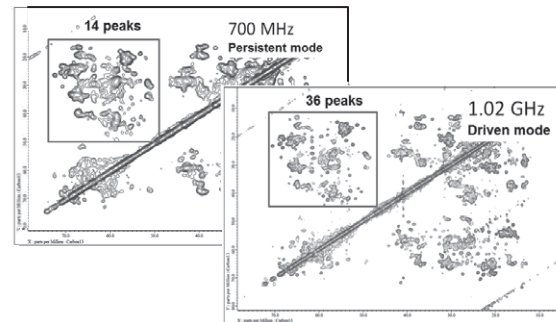


Fig.1. Comparison of the solid-state NMR spectra, DARR, between 700 MHz NMR and 1020 MHz NMR. Effect of 1020 MHz is clearly demonstrated.

一標識化試料)。試料の冷却装置が未設置のため、試料回転 (15 kHz) と ¹H ハイパワーデカップリング (70 kHz) を抑えた条件で測定した。即ち、計測条件としては必ずしも最適化されていない。試料温度は試料中の水の信号から見積もられ 40°C 程度であった。

3. 実験結果と考察

得られた 2 次元スペクトル (¹³C-¹³C DARR, dipolar assisted rotational resonance) の aliphatic carbon 領域を Fig. 1 に示す (スペクトルはタンパク質の炭素骨格間の距離を求める計測である)。等高線で示したピークは縦軸の周波数を持つ原子と横軸の周波数を持つ別の原子が分子中の近傍にあることを示している。最近傍の原子は化学結合でつながれた隣なので、強い信号をたどると帰属 (炭素が主鎖のどの部分に対応しているのかを把握すること) ができる。同様の条件で 700 MHz NMR で測定したスペクトルと比較する。本来ピークは小さな丸で示されるが、近くのピークと一緒に山の高さの等高線のようになっているところがほとんどである。分解能が上がると、小さな丸で表現された、分離されたピークが増えてくる。対応する原子が一意に決まれば、確度の高い帰属や構造決定に使えるようになる。700 MHz と 1020 MHz で、ピークの太さ (線幅) を Hz 単位でみると、同等である。その上で、ピーク間隔が磁場によって広がることで、分解能が上がっていることがわかる。この測定では、磁場の効果が十分発揮され、2 次元の信号分離は、比例以上の効果 (1.7 倍 → 2.6 倍) があることがわかる。

4. まとめ

1020MHz NMR で膜タンパクの計測を行い、超高磁場の効果を実証することができた。

[1] H. Maeda et al. eMagRes, to be published [2016]

限流機能を付加した縦磁界ケーブルの開発

Development of longitudinal magnetic field cable with fault current limiting function

大隈 翔悟, 木内 勝, 小田部 荘司, 松下 照男(九工大)

OHKUMA Shogo, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, MATSUSHITA Teruo (Kyushu Inst. of Tech.)

E-mail : ohkuma@aquarius10.cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

電流 I の通電方向に平行に磁界 B が加わる縦磁界下では、非縦磁界下に比べて臨界電流 I_c が大きく増加する。現在、この特性を利用した直流電力ケーブルの開発が行われている[1]。このようなケーブルを使用する際は、落雷等の事故時に生じる過電流からケーブル及び端末を保護する限流器が必要になる。一般的に過電流保護として適所に限流器を配置するが、ケーブル自体に限流機能を付加する場合もある。Fig. 1に、内側3層、外側3層の限流機能付きケーブルを構造図を示す。内側層の外側と、外側層の外側の銅層が限流器で、縦磁界を弱める方向に巻かれている。もし、事故時に I_c 以上の過電流がケーブルに加わると、この銅層に電流が流れ、縦磁界を弱める方向に磁界がケーブルに加わる。さらにこの縦磁界の減少は I_c 低下を引き起こすことになる。この作用が繰り返し起こることで、最終的にケーブルの電流容量は大きく限流されることになる[2]。

本研究では、過電流により発生する自己磁界が縦磁界効果を弱める限流器機能を付加した縦磁界電力ケーブルについて、電流容量が変化した場合の限流効果を数値解析し、この限流器の有効性を調べた。

2. 限流モデル

過電流が加わったときに最終的に銅層へ分流する総電流量 δI を求める。ケーブル全体へ流れた全通電電流量を I とし、ケーブルの臨界電流 I_c とすると銅層へ分流する電流 ΔI_0 は

$$\Delta I_0 = I - I_c$$

である。この ΔI_0 により発生する自己磁界が縦磁界を弱め、 I_c が減少し、再び銅層への分流と、この減少が繰り返し起こることになる。ここで初期の状態からの分流電流 ΔI_1 は銅層の磁界定数 K_{dc} を用いて

$$\Delta I_1 = \Delta I_0(I_c(0)\alpha K_{dc})$$

と表される。 α は層数に依存するパラメータである。ここでは、縦磁界下での臨界電流の磁界 B_e 依存性として、自己磁界の $I_c(0)$ を用いて

$$I_c = (1 + \alpha B_e)I_c(0)$$

を仮定した。したがって、 n 回目の分流電流は

$$\Delta I_n = \Delta I_0(I_c(0)\alpha K_{dc})^n$$

となる。ここで、 $\varepsilon = I_c(0)\alpha K_{dc}$ とおくと、銅層へ流れる総電流量 δI は、

$$\delta I = \sum_{i=0}^n \Delta I_i = \Delta I_0(1 + \varepsilon + \varepsilon^2 + \varepsilon^3 + \dots + \varepsilon^n) \approx \frac{\Delta I_0}{1 - \varepsilon}$$

となる。ただし、 $\varepsilon < 1$ である。

したがって、銅層へ分流した後のケーブルの臨界電流 I'_c は、

$$I'_c = I - \delta I$$

となる。以上を用いて、ここでは1層ケーブルの場合は $\alpha = 1.5 \times 10^{-3}$ 、6層ケーブルの場合は $\alpha = 5.0 \times 10^{-3}$ を用いて解析を行った。

3. 結果と考察

Fig. 2に過電流 $I/I_c(0)$ と臨界電流の減少率 $I'_c/I_c(0)$ の関係を示す。破線は限流機能がない場合である。結果から限流

機能を付加することで、1層及び6層においても過電流による I_c 減少が確認でき、このような銅層による限流器で限流が可能であることが示された。特に、ケーブルの臨界電流 $I_c(0)$ の2.5倍の電流が通電された場合、1層での I_c の減少は1割程度であるが、6層では5割以上とその効果は大きくなる。これは多層構造の方が、縦磁界が大きくなり、 I_c の増加が大きいためである。したがって、ケーブルの多層化に伴い、ケーブル容量の大きな増加ばかりでなく、大きな限流効果も期待できることがわかった。

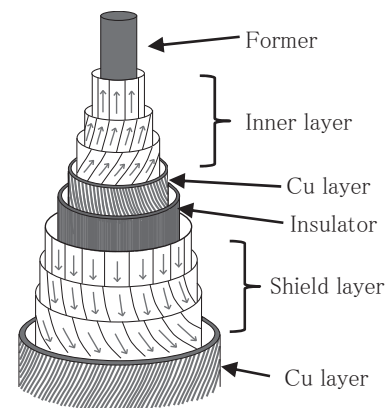


Fig.1: The structure of 3 layers superconducting cable

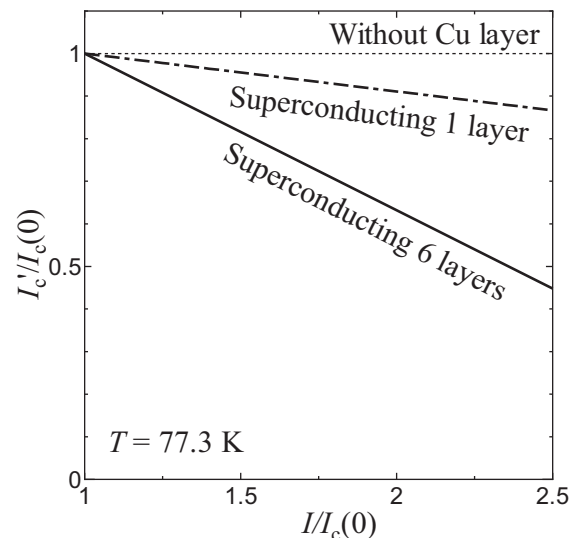


Fig.2: The decreasing rate of I'_c vs. normalized overcurrent I

参考文献

1. T. Matsushita, *et al.*: Superconductor Science and Technology, 25 (2012) 125009.
2. T. Matsushita, *et al.*: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 25 (2015) 5401704.

500m 級超電導直流ケーブルシステムの冷却・通電試験

Cooling and Current transport experiment in

500m-class DC Superconducting Power Transmission Line

筑本 知子, 渡邊 裕文, ユーリ・イワノフ, 山口 作太郎 (中部大, I-SPOT);

石山 功太郎, 大石 前次(千代田化, I-SPOT); 豊谷 和晃, 渡部 充彦(住友電工, I-SPOT)

CHIKUMOTO Noriko, WATANABE Hirofumi, IVANOV Yury, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ., I-SPOT);

ISHIYAMA Kotaro, OISHI Zenji (Chiyoda Corp., I-SPOT);

TATAMIDANI Kazuaki, WATANABE Michihiko (Sumitomo Electric Industries, I-SPOT)

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

経済産業省からの委託による「高温超電導直流送電システムの実証研究」(平成 24 年度経済産業省からの委託)は、石狩新港地域を実証サイトとして、高温超電導直流送電システムを建設し、データセンタ等の直流需要施設と直流電源施設あるいは商用交流変電所からの送電を行うことによって、トータルシステムとしての実運用システムの構築、さらに将来の長距離送電システムを実用化するための技術的、制度的課題を抽出することを目的としている[1,2]。本試験では2回線を設置し、回線1は太陽光～データセンタ間に直流超電導線(500m)を地下埋設設置し、通電安定性を検証した後、実運用する。一方、回線2は直流超電導線(1km)を地上置きとして、上流側に仮設電源、下流側に仮設負荷を設置し、将来の長距離化に向けてのデータ取得および特殊試験等を行う予定である。

本講演では、今年5月～6月および8月～10月に回線1にて実施した2回の冷却試験、通電試験の概要を報告する。

2. 回線1のシステムの概要

回線1の構成を Fig.1 に簡単に示す。回線1は太陽光発電装置から送電される直流電力を 500m 送電棟(建屋2、B 端末)と 500m 受電棟(建屋1、A 端末)を結ぶ超電導ケーブル(埋設)を通してさくらインターネット(株)に供給する設備であり、超電導ケーブルの途中に接続部が1カ所設置されている。各建屋に設置する機器の構成を Fig.2 に示すが、冷凍機、循環ポンプ、LN2リザーバタンク等は建屋1に設置し、液体窒素は建屋1からケーブルを格納したケーブル管に供給され、建屋2からリターン管にて建屋1に戻される。断熱二重管は直管断熱二重管構造であり、二本のケーブル管とリターン管を内管として配置している。また、冷凍機は2kW ターボブレイTON 冷凍機(太陽日酸製)と1kW スターリング冷凍機(AISIN 製)を並列に設置している。

3. 冷却・通電試験の概要

今まで2回にわたって冷却・通電試験を実施した。それぞれの試験の主な項目以下の通りである。

(1) 第一回全体試運転試験(2015年5月18日～6月19日)

①初期冷却試験、②液体窒素循環・冷却試験、③全体入熱量測定試験(77K)、④全体圧力損失測定試験(77K)、⑤ケーブル確認試験(静電容量、直流耐電圧、誘電正接温度特性、Ic 測定)(77K)、⑥定格電流通電試験(5kA,77K)、等

(2) 第二回全体試運転試験(2015年8月24日～10月2日)

①初期冷却試験、②液体窒素循環・冷却試験、③全体入熱量測定試験(70K)、④全体圧力損失測定試験(70K)、⑤ケーブル確認試験(静電容量、直流耐電圧、誘電正接温度特性、Ic 測定)(70K)、⑥定格電流通電試験(600A×8日間、70K)、⑦PV データセンター間送電試験(12日間)等

一例として、Fig.3に第一回全体試運転にて実施した定格電流通電試験の結果を示すが、5kA30分間の通電が確認された他、全体入熱量測定試験では、プロジェクト目標値である1.5W/mを満たす性能が確認された。

謝辞 本研究は経済産業省 委託事業「高温超電導直流送電システムの実証研究」(平成 24 年度)、「高温超電導技術を用いた高効率送電システムの実証事業」(平成 25 年度)として実施した。

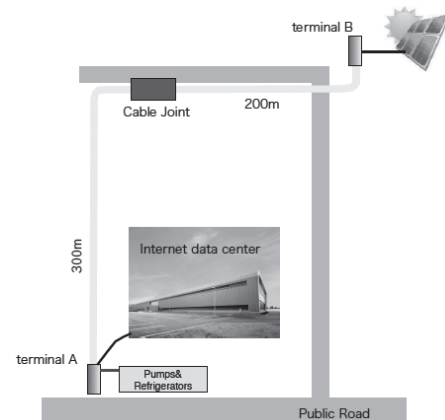


Fig.1 Schematic view of Ishikari line 1

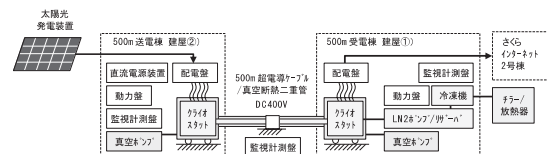


Fig.2 Configuration of equipment in line 1

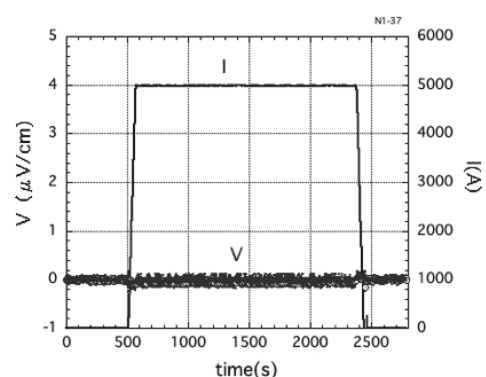


Fig.3 Result of current loading test with 5 kA for 30min.

Voltage monitored for the inner conductors were plotted. We also monitored the voltage for the outer conductors and it showed an identical result.

参考文献

1. S. Yamaguchi et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.88 (2013) p.23.
2. N. Chikumoto et al., Abstracts of CSSJ Conference, Vol.89 (2014) p.40.

66kV 系 40m 高温超電導ケーブルの短絡電流試験に向けた 冷媒の温度・圧力解析

Coolant Temperature and Pressure Simulation for Short-circuit Current Test on 40 m HTS Cable for 66 kV Transmission Lines.

安井 鉄郎, 竹田 夏子, 横尾 祐輔, 香村 祐美, 我妻 洗, 石山 敦士(早稲田大学); 王 旭東(KEK);
大屋 正義, 増田 孝人(住友電工); 本庄 昇一(東京電力)

YASUI Tetsuo, TAKEDA Natsuko, YOKOO Yusuke, KOMURA Yumi, AGATSUMA Koh, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);
WANG Xudong (KEK); OHYA Masayoshi, MASUDA Takato(SEI); HONJO Shoichi(TEPCO)
E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

高温超電導ケーブルを実系統に適用する為には、短絡電流通過時の安全性確保が必要不可欠である為、我々は高温超電導ケーブルの導体温度及び冷媒液体窒素の温度・圧力を計算する数値解析プログラムの開発を行ってきた。本研究では、冷却システム系統までモデル化した温度・圧力連成解析プログラムを用いて、住友電気工業株式会社・熊取試験場で実施予定の約 40m 長の超電導ケーブル短絡電流模擬試験について数値実験を行ったので報告する。

2. 40m ケーブルコア構造及び数値解析モデル

平成 22 年に行われた NEDO プロジェクト 30m ケーブル短絡電流模擬試験から、短絡事故により生じるジュール熱によりフォーム内部に染み込む液体窒素が気化し、冷却システム全体の圧力を上昇させることが確認された。そのため、今回行われる 40m ケーブル模擬試験ではフォーム内部に液体窒素が殆ど染み込まない構造に改良した。図 1 に冷却システムのモデル図を示す。超電導ケーブル本体の冷媒の物性値は、流体の特性を計算するコンピュータプログラムである GASPAC を用いて導き出した。GASPAC は 2 つの入力パラメータを用いて他のパラメータを出力するものであるが、今回エンタルピー H 及び圧力 P を入力パラメータとして、それぞれ式(1)式(2)を用いて毎時間・毎要素ごとに導き出した。

$$\Delta H = H_{(n,t+\Delta t)} - H_{(n,t)} = \Delta t \left\{ \frac{(2Q_{ht(n,t)} + Q_h) dl}{V \rho_{(n,t)}} + \frac{v_{(n,t)}}{dl} (H_{(n-1,t)} - H_{(n,t)}) \right\} \quad (1)$$

$$P_{(n,t)} = P_{(n-1,t)} - \frac{2f \rho_{(n-1,t)} \{v_{(n-1,t)}\}^2 dl}{De} \quad (2)$$

ここで、 $2Q_{ht}$ はケーブルコア壁面からの強制対流伝熱(係数の 2 は 2 心短絡を示している。), Q_h は外部からの侵入熱、 V は要素体積、 v は流速、 dl は要素長、 f は摩擦係数、 ρ は密度、 De は水力直径を示している。

図 1 に示す A 端、B 端、リザーバタンク、ポンプ吐出部分の各圧力は、今回気体が発生しない場合を考えているため、液体の変化量のみを用いた式(3)で計算した。

$$P = \frac{P_0}{1 - \frac{\Delta V_{liquid}}{V_{gass0}}} \quad (3)$$

ΔV_{liquid} : 液体変化量 V_{gass0} : 初期気体体積

3. 解析結果・考察

フォーム内部の窒素の影響を確認するため、30m ケーブル短絡電流模擬試験の圧力変化とフォーム内部に液体窒素が染み込まないと仮定した場合の 30m ケーブル圧力解析結果を比較したグラフを図 2 に示す。フォーム内部から気化した窒素が圧力上昇に大きな影響を与えていることが確認できる。図 3 及び図 4 に今回実施予定の 40m ケーブルに、66kV 系統における最大想定短絡電流 31.5kA-2.0s が流れた場合における温度及び圧力の解析結果を示す。実験予定値を用いて A 端末部の初期圧力を 300kPa、初期冷媒温度を 70K、ポンプによる流量値を 40L/min とした。

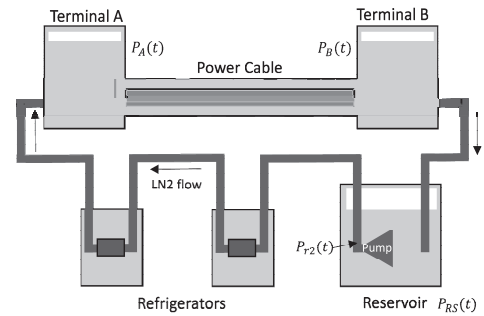


Fig. 1 Schematic Diagram of Refrigerator System Model.

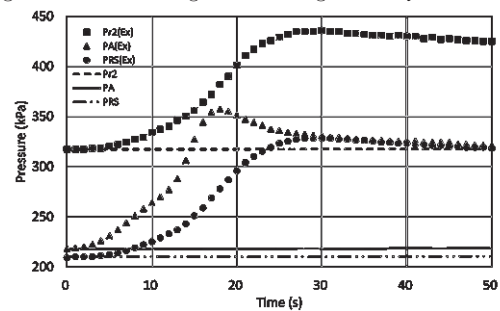


Fig. 2 Comparison with Experimental and Calculation Results of Pressure on a 30m Test Cable.

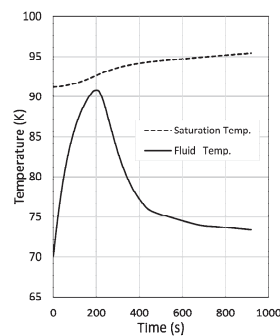


Fig.3 Calculated Cable Outlet Temperature Profile on a 40m Test Cable.

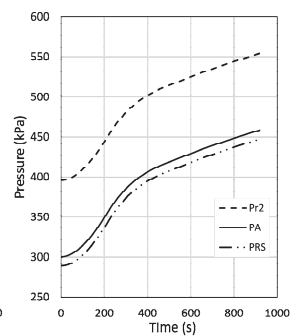


Fig.4 Calculated Pressure Profiles on a 40m Test Cable.

4. 今後の予定

今回の温度圧力解析結果と今後行われる 40m ケーブル模擬試験の結果を比較して、解析コードの改良を進めていく。

謝辞

本研究は、「次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究」の一環として NEDO の助成により実施した。

参考文献

- H.Yumura, Y.Ashibe, M.Ohya, et al.; IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol.23(2013)
- Y.Sato, T.Yasui, K.Agatsuma, et al.; Abstracts of CSSJ Confedence, Vol.90(2014)p.22

66kV 級超電導ケーブルの地絡事故特性 (2) –ケーブルコア試験– Ground Fault Characteristics of 66 kV-class HTS Cables (2) –Cable Core Test–

大屋 正義, 南野 忠彦, 増田 孝人(住友電工); 中野 哲太郎, 丸山 修, 三村 智男(東京電力)
OHYA Masayoshi, MINAMINO Tadahiko, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries Ltd.);
NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, MIMURA Tomoo (Tokyo Electric Power Company)
E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

電力ケーブルの実用化に際しては、地絡事故特性の評価が必須であるが、超電導ケーブルの地絡事故に対する検討はほとんど行われていない。抵抗接地系である 66kV 系統の地絡電流値は 1500A 程度と小さいものの、地絡点で発生するアークによって断熱管に穴が開いたり、液体窒素の蒸発によって内圧が上昇したりする可能性がある。前報[1]では、地絡事故特性評価の第一歩として実施したシートサンプル試験の結果について報告したが、本報では、次の段階として、ケーブルコアサンプルを用いて実施した地絡試験の結果について報告する。

2. シート試験

試験装置概要を図 1 に示す。SUS 容器中で 180mm φ のシートサンプルを液体窒素で浸漬冷却し、導体層を模した銅通電棒とシールド層を模した銅板の間に 1500A の電流を 2 秒間通電した。絶縁層 (PPLP[®], 7mm 厚) に小さな穴を空けて糸半田を仕込み、電極棒と銅板を導通させているが、糸半田は通電開始後すぐに蒸発してアークが発生する[2]。銅板と断熱管内管を模した SUS 板は同一端子に接続されており、アークが保護層を貫通すると SUS 板に電流が分流する。保護層厚が 3.6mm の時は数サイクルで SUS 板に電流が流れ始めたが、保護層厚が 5.5mm の時は分流が発生せず、SUS 板へのアーク到達を防げることを検証した。

3. ケーブルコア試験

(1) 試験装置

上記シート試験結果を反映し、保護層厚 7.5mm のケーブルコアサンプルを製作して地絡試験を実施した。試験装置概要は図 2 に示すとおりであり、コアサンプルを SUS コルゲート管の下部に押しつけた状態で FRP 製のオープン容器にセットし、液体窒素で浸漬冷却した。シートサンプルと同様に、絶縁層 (PPLP[®], 7mm 厚) に糸半田を仕込んでおり、地絡点と SUS コルゲート管の突起部が一致するように固定した。

(2) 試験結果

1500A、2秒の地絡試験時の電圧・電流波形を図3に示す。通電開始後に一旦電流が途切れるが、すぐにアークが発生して電流が復帰した。通電開始から約40msでSUS管に電流が流れ始め、非常に短時間でアークがSUS管に到達した事が分かる。試験後の解体調査においてSUS管に穿孔が確認され、シート試験とは大きく異なる結果となった。

4. まとめ

シート試験では、地絡部で発生した気化ガス等が下方方向だけでなく、シートの隙間を通して横方向に逃げる余地があるのに対して、コア試験ではラジアル方向にしか逃げ場がない点が大きく異なる。このため、高圧ガスが局所的に保護層を突き破って吹き出したことにより、大きく異なる結果が発生したと推察する。今後、本試験結果を反映して、コア試験と等価な評価が行えるようにシート試験方法の改善を図っていく。そして、コア外への放圧を抑制可能な保護層構造の検討を行い、超電導ケーブルのコンパクト性とバランスを取りながら耐地絡設計に取り組んで行く。

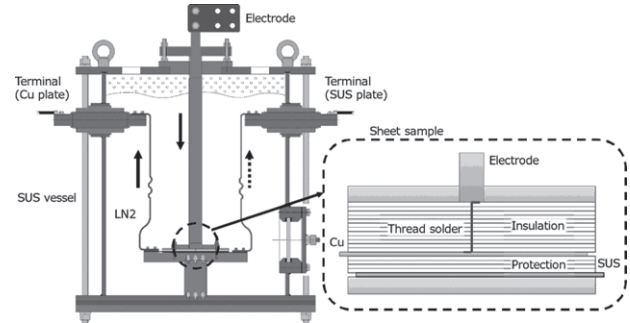


Fig.1 Schematic view of test apparatus for sheet test.

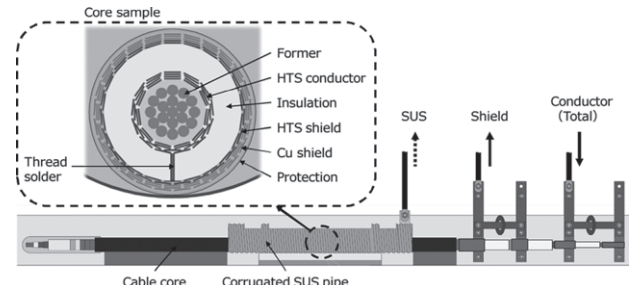


Fig.2 Schematic view of test apparatus for cable core test.

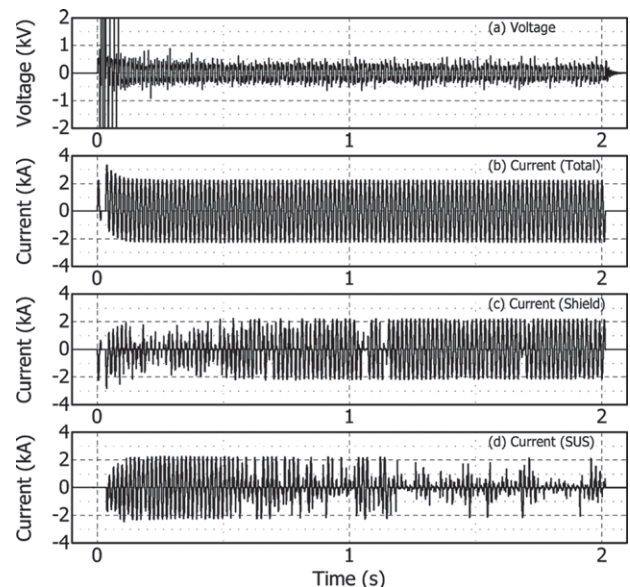


Fig.3 Waveforms of voltage and current.

謝辞

本研究の一部はNEDOの助成により実施したものである。

参考文献

1. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 91 (2015) p.155
2. S. Tanaka, et al.: IEEJ Electric Power and Energy Convention (2013) No. 403

各相が多層で構成される三相同一軸高温超電導ケーブルの 電流分布と交流損失特性

Current distribution and AC Loss characteristics in HTS tri-axial cable
composed of multi-layers in each phase

北谷 大貴, 榊原 稜二, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(前川製作所)
KITAYA Daiki, SAKAKIBARA Ryoji, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
HAMAJIMA Takataro (Mayekawa Mfg.)
E-mail: d.kitaya@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

三相同一軸超電導ケーブルはコンパクト・低損失な構成として注目されているが、各相の径が異なるため、三相平衡を実現するために各相のインピーダンス調整が必要となる。これまでは、各相一層で構成されるケーブルにおいて撚りピッチを調整することで三相平衡を実現してきた[1]。しかし、ケーブルの大容量化には、各相を複数の層で構成する必要があり、ケーブル内の電流分布はより複雑になる。そこで、本研究では、各相が複数の層で構成される三相同一軸超電導ケーブルにおいて、三相平衡を実現するケーブル構成方法や交流損失の低減に有効なケーブル構成方法について検討した。

2. 解析方法

本解析に用いたケーブルの諸元を Table.1 に示す。各相は二層構成とし、撚りピッチは 100~500mm の間で変化させた。撚りピッチ、および各層半径からケーブルのインダクタンスを計算し、Fig.1 に示す等価回路から連立方程式を作成して各層電流を求めた。そして、得られた電流分布より交流損失を算出した。なお、本解析では、ケーブルに接続する負荷がケーブル自身のインピーダンスより十分大きい場合を想定し、交流損失の計算では先行研究で導出した理論式を用いた[2]。

3. 解析結果

撚りピッチを 100~500mm において 100mm 間隔で変化させ、各層電流が均一になる撚りピッチの組み合わせを算出した。この時の撚りピッチを Table.2 に、交流損失の計算結果を Fig.2 に示す。次に、各相の層間電流を負荷率 75% 以下で偏流させ、交流損失の低減が可能となる撚りピッチの組み合わせについて検討した。この時の撚りピッチを Table.2 に、交流損失を Fig.2 に、電流分布を Fig.3 に示す。均流時と比較すると、特に V 相における損失が低減され、全体では 13.41W/m から 11.69W/m と約 13% 低減できることがわかった。V 相における損失低減の要因としては、偏流による印加磁場の低減が考えられる。ここで、V 相 1 層目の外側および 2 層目の内側に印加される周方向磁場は式(1)で表される。

$$B = \mu_0 \frac{I_U + I_{V1}}{2\pi r_{V1}} \quad (1)$$

ただし、 I_U は U 相の合計電流、 I_{V1} は V 相一層目の電流である。Fig.3 に示すように、損失低減型では V 相の層内電流は位相がずれて偏流している。U 相電圧を基準にすると、V 相一層目の電流の位相は、均流時の 120° から約 146° へと変化している。そのため、均流時に比べて I_U によるキャンセル分が大きくなり、正味の磁場が減少したと考えられる。

以上より、層内電流を偏流させることで、均流時より損失を低減できる可能性があることがわかった。

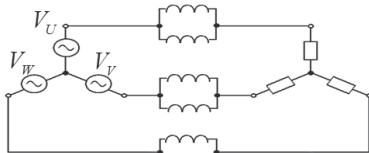


Fig.1 Electrical circuit of tri-axial cable

Table.1 Specifications of an HTS tri-axial cable

Nominal voltage [kV]	66	
Transport current [kA]	6	
Cable length [m]	1000	
Layer radius [mm]	U1 / U2	44.6 / 47.0
	V1 / V2	62.8 / 64.2
	W1 / W2	80.4 / 81.8

Table.2 Twist pitch of each layer

	Phase-U		Phase-V		Phase-W	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
Current uniform type						
Twist pitch [mm]	200	200	300	300	500	500
Twist direction	Z	S	Z	S	Z	S
Critical current [kA]	11.55		16.35		22.65	
Low loss type						
Twist pitch [mm]	300	200	500	500	400	400
Twist direction	Z	S	S	Z	Z	S
Critical current [kA]	12.15		18.45		21.45	

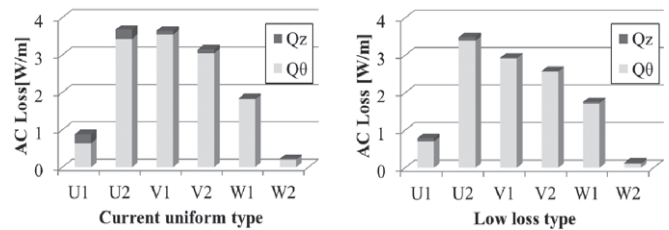


Fig.2 AC Loss of each layer

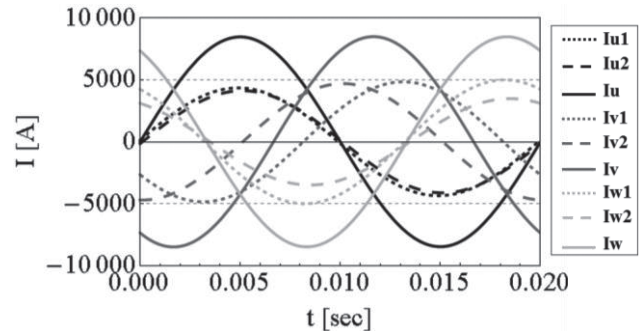


Fig.3 Current waveform in a low loss type cable

参考文献

- S. Ono, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p.190
- T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai, S. Monma, H. Sato and K. Shimoyama: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 17 (2007) p.1692-1695