

SuperKEKB 衝突点用超伝導電磁石システムの設計

Design of the Final Focusing Superconducting Magnet System for SuperKEKB

大内徳人, 土屋清澄, 岩崎昌子, 多和田正文, 東憲男, 宗占国, 大木俊征, 山岡広(高エネルギー加速器研究機構)
 OHUCHI Norihito, TSUCHIYA Kiyosumi, IWASAKI Masako, TAWADA Masafumi, HIGASHI Norio,
 ZHANGUO Zong, OKI Toshiyuki, YAMAOKA Hiroshi (KEK)
 E-mail: ohuchi@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、 B ファクトリーマシンとして稼働してきた KEKB ビーム衝突型加速器のアップグレードを2010年度より開始している。この加速器は SuperKEKB と呼ばれ、KEKB 加速器で記録した世界最高の電子・陽電子衝突頻度を更に約40倍高めることを目標としている。SuperKEKB では、加速器の心臓部である電子・陽電子ビーム衝突部の超伝導電磁石も新しく作り変え、2014年度にビーム運転を開始する予定である。本学会では、検討が進んでいる SuperKEKB ビーム衝突用超伝導電磁石システムの設計について報告を行う。

2. ビーム衝突点超伝導電磁石システム

SuperKEKB の最終ビーム収束システムは、電子・陽電子各ビームラインに組込まれる超伝導4極電磁石のダブレットで構成される。図1にビーム衝突点(Interaction Point:IP)のシステム概略図を示してある。IPの最も近傍には陽電子ビーム(LER)を収束する為のQC1RP、QC1LPが配置され、その後方に電子ビーム(HER)用QC1RE、QC1LEが配置される。QC1の後方にはQC2が各ビームラインに配置され、8台の超伝導4極電磁石でビーム衝突を調整する。これら超伝導4極電磁石はIPの左右で1台のクォータットに組込まれる。この超伝導電磁石は、素粒子検出器内部に据え付けられ1.5Tの検出器ソレノイド磁場の中で運転される。検出器ソレノイド磁場はビームの衝突性能を劣化させるため、このソレノイド磁場と逆向きの磁場をもつ超伝導補正ソレノイドを配置し、ビーム軸上の積分量として $0 \text{ T} \cdot \text{m}$ に調整してある。4極磁石はこの補正ソレノイドボア内に組込まれる。図2に素粒子検出器内部のソレノイド磁場分布と8台の超伝導電磁石の位置を示した。QC1RP、QC1LPには夫々最大で -2.2 T と -2.5 T のソレノイド積分磁場が印加される。

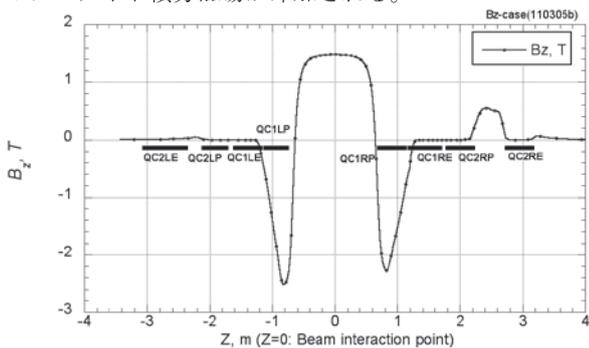


Fig. 2 Solenoid field profile in the beam interaction region

3. 超伝導4極電磁石(QC1,2)設計

8台の超伝導電磁石のうち、最もIPに近い超伝導4極電磁石の断面形状を図3に示した。ソレノイド磁場が2Tを超える為、この磁石は鉄ヨークの無い空芯磁石である。超伝導磁石は2層コイルで形成され、ボア内にはビーム軌道補正用の4種類の超伝導補正コイル(b_4, a_2, b_1, a_1)が巻かれる。更に、空芯の超伝導4極電磁石から電子ビームラインへの漏れ磁場を消去する為に、キャンセルコイルが対向ビームパイプに取り付けられる。QC1R/LPの設計磁場勾配は 75 T/m で、実効磁場長は 0.3 m である。磁石本体は小型の磁石であるが、4極磁場に対するエラー磁場が 10^{-4} 以下になるように設計されている。他の4極磁石ではソレノイド磁場が殆ど0Tまで下げられる為、鉄ヨークをコイルカラー外周部に組み付ける設計としている。表1に8台の磁石の構成を示した。

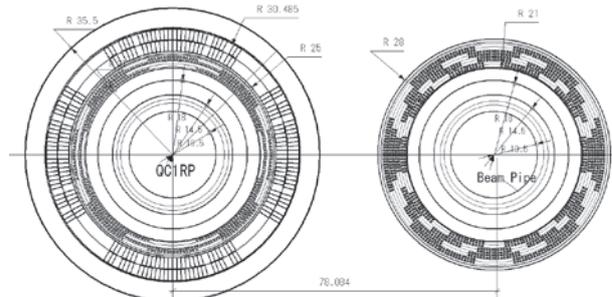


Fig. 3 Cross section of QC1RP S.C. quadrupole for e^+ beam and the S.C. correctors for e^- beam

Table 1: Superconducting Final Focusing Quadrupole System

	Integral field gradient, T	Magnet Type	Corrector	L.F. cancel coil
QC2RE	12.91	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2RP	10.92	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC1RE	26.22	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC1RP	22.43	SC	b_4, a_2, b_1, a_1	b_3, b_4, b_5, b_6
QC1LP	22.91	SC	b_4, a_2, b_1, a_1	b_3, b_4, b_5, b_6
QC1LE	26.03	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2LP	10.96	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA
QC2LE	14.13	SC+Fe	b_4, a_2, b_1, a_1	NA

4. まとめ

SuperKEKB ビーム衝突点超伝導電磁石システムの概念設計を示した。システム及び磁石設計は現在進行中であるが、磁石のパラメーター等、学会にて詳細を報告する。

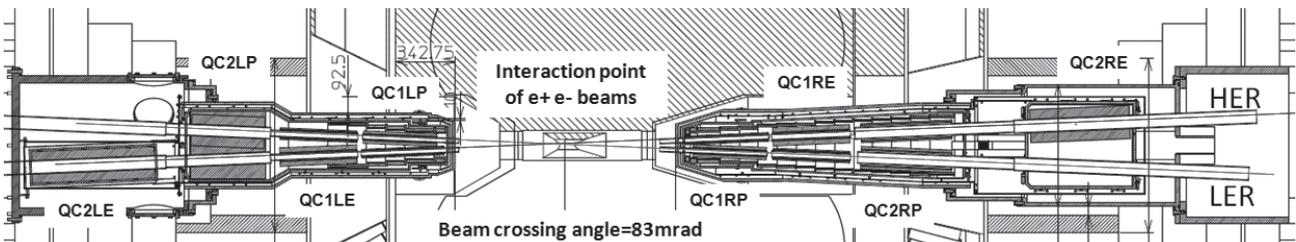


Fig. 1 Superconducting magnet system for SuperKEKB Interaction Region

ILC 用クライオモジュールの開発 (4) -S1-Global クライオモジュールダイナミック損失測定- Development of cryomodule for ILC superconducting cavities (4) - Dynamic loss measurements of S1-Global cryomodule -

大内徳人、加古永治、小島裕二、近藤良也、土屋清澄、寺島昭男、仲井浩孝、早野仁司、
 東憲男、原和文、福田茂樹、細山謙二、久松広美、松本利広、道園真一郎、山本明(高エネルギー加速器研究機構)
OHUCHI Norihito, KAKO Eiji, KOJIMA Yuuji, KONDOU Yoshinari, TSUCHIYA Kiyosumi, TERASHIMA Akio,
 NAKAI Hiroataka, HAYANO Hitoshi, HIGASHI Norio, HARA Kazufumi, FUKUDA Shigeki, HOSOYAMA Kenji,
 HISAMATSU Hiromi, MATSUMOTO Toshihiro, MICHIZONO Shinichiro, YAMAMOTO Akira (KEK)
 E-mail: ohuchi@post.kek.jp

1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構(KEK)では、国際線形衝突型加速器(ILC)用クライオモジュールの研究開発として、米国FNAL及びSLAC研究所、ドイツDESY研究所、イタリアINFN研究所と共同でILCクライオモジュールと殆ど同じ寸法となるS1-Globalクライオモジュール[1,2]を製作し、低温試験を行ってきた。低温試験は昨年6月から始まり、今年2月で全て完了した。本学会では、この低温試験で行われた超伝導空洞ダイナミック損失の測定について報告する。

2. S1-Global クライオモジュール

図1に、S1-Globalクライオモジュールの全体図を示してある。イタリアINFN研究所で製作したCryomodule-CとKEKが製作したCryomodule-Aから構成されている。Cryomodule-Cには米国FNAL・ドイツDESYの4台の超伝導空洞が組込まれて、Cryomodule-Aには4台のKEK空洞が組込まれている。図2にKEKクライオモジュールの断面図を示してある。超伝導空洞は2Kの蒸発ガスを通す内径300mmのSUSパイプ(Gas Return Pipe, GRP)から支持され、超伝導空洞容器とGRPは、5Kと80Kの2組の熱輻射シールド板により熱遮蔽されている。8台の超伝導空洞は2Kの飽和蒸気圧液体ヘリウムで冷却される。RFパワーは入力カップラーから超伝導空洞へ供給される。入力カップラーは室温の真空容器と2Kの超伝導空洞を直接接続している。

3. S1-G クライオモジュールダイナミック損失測定

超伝導空洞の性能は空洞の発生することのできる加速勾配と運転時に発生する熱損失(ダイナミック損失)で評価される。超伝導空洞のダイナミック損失は2Kでの熱負荷となることから ILC の低温機器の設計に与える影響が非常に大きい。S1-G クライオモジュールでは、FNAL、DESY、KEK の4台の空洞についてダイナミック損失を測定した。熱負荷は、液体ヘリウムの蒸発量を減圧ポンプ出口の室温・大気圧状態で測定し、蒸発潜熱から計算した。ILCで検討されている超伝導空洞の加速勾配は31.5 MV/mであり、その時のダイナミック損失は0.86 W/空洞1台で

ある。表1にダイナミック損失の測定結果を纏めてある。測定は、各空洞が約30分以上連続運転可能な最大加速勾配で行われた。表中の Q_D 、 Q_{D-det} 、 Q_{D-cav} は空洞運転時のダイナミック損失全体、入力カップラーでの損失、空洞での損失を示している。KEKの空洞はILCの運転加速勾配を越えて測定できたが、4台の空洞共ILCの目標損失を達成できなかった。

試験の詳細については、学会にて報告する。

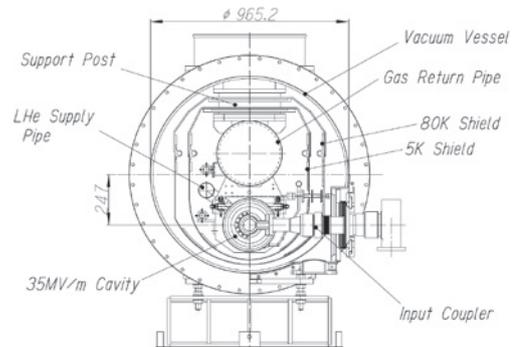


Fig. 2 Cross section of Cryomodule-A (KEK)

Table 1: Measured dynamic losses of four cavities

	FNAL AES004	DESY Z109	KEK MH17	KEK MH16
LHe Temp., K	1.97	1.97	1.97	1.98
LHe Press., kPa	3.25	3.22	3.26	3.28
Accel. gradient, MV/m	25.2	28.0	32.3	38.0
Q_D , W	1.4	0.84	2.8	4.8
Q_{D-det} , W	0.18	0.09	0.7	1.8
Q_{D-cav} , W	1.3	0.75	2.0	2.9

参考文献

[1] N. Ohuchi, et al.: Proceedings of LINAC10 Conf. Tukuba, Japan (2010), MO302.
 [2] N. Ohuchi, et al.: Abstract of CSJ Conf. 83 (2010), 1B-p01, p33.

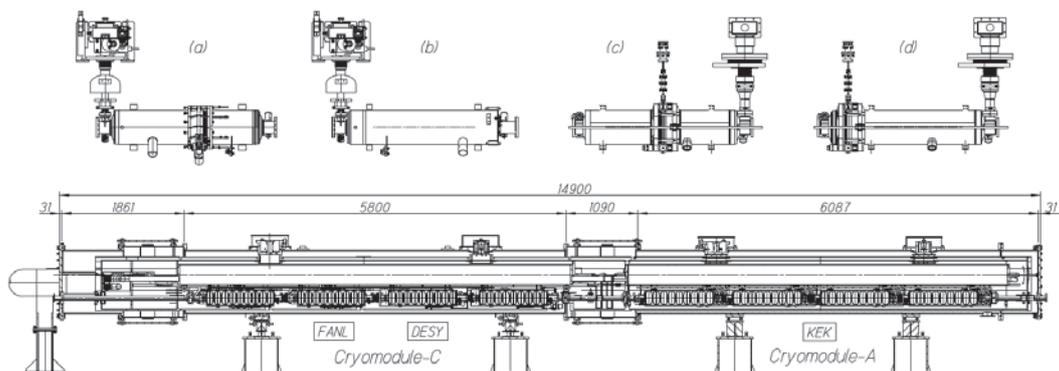


Fig. 1 S1-Global cryomodule. (a) FNAL cavity: 2 sets, (b) DESY cavity: 2 sets, (c) KEK cavity-a: 2 sets, (d) KEK cavity-b: 2 sets

薄膜線材を用いたコイル支配型 FFAG 加速器マグネットの磁界設計

Magnetic field design of coil-dominated magnet wound with coated conductors for FFAG accelerator

高橋 慶多, 雨宮 尚之, 中村 武恒, 森 義治(京大); 荻津 透(KEK);
吉本 政弘(原子力機構); 渡辺 郁男, 吉行 健(東芝); 野田 耕司(放医研)

TAKAHASHI Keita, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune, MORI Yoshiharu (Kyoto Univ.); OGITSU Toru (KEK);
YOSHIMOTO Masahiro (JAEA); WATANABE Ikuo, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba); NODA Koji (NIRS)

E-mail: amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導線の加速器マグネットへの応用に向けて, 今回, 薄膜線材を用いたコイル支配型 FFAG 用マグネットの概念設計を行ったので報告する。

FFAG 加速器では, Fig. 1 に示す FFAG 加速器のビーム軌道概念図の様に, ビームの加速と共にビーム軌道の半径が大きくなるという特徴がある。また, FFAG 加速器は, 磁場が時間的に一定であるため直流マグネットにより構成でき, かつ強収束性を併せ持った加速器である[1]。

2. FFAG マグネットの磁界設計

設計マグネットの概要を Table 1 に示す。マグネットボア半径 0.7m, 鉄ヨークの内半径 0.85 m, ビームエクスカージョン 0.72 m, 装置中心-マグネット中心間距離 4.3 m, マグネット中心磁場 2.55 T, k 値 9 の FDF triplet 型 FFAG 用 Focus マグネットの概念設計を行った。線材幅 3 mm, 厚さ 0.2 mm の薄膜線材を 10 本束ねて巻線することを想定し, 線材断面に対する電流密度は 500 A/mm²まで許容すると仮定した。線材配置は発生磁場誤差を最小化するように最適化を行った。

マグネット開口部の巻線部では Frenet-Serret の公式を用いて線材の edge-wise 曲げ, flat-wise 曲げ, 捻りを計算した [2]。ここで, 線材の edge-wise 曲げ歪を 0.3 %, flat-wise 曲げ半径を 20 mm まで許容して線材配置を行った。Fig. 2 に設計したマグネットの形状を示す。マグネットボアが大きいため, edge-wise 曲げ歪をある程度抑えた線材配置は可能であるが, 製作上は課題が多く, 巻線技術の他, 別の巻線方法の検討も必要である。また, 発生磁場領域が広いことから, 使用線材量が多くなってしまったため, 磁場が比較的小さくて済むスパイラル形 FFAG 加速器も今後検討していく。

3. まとめ

薄膜線材の flat-wise 曲げ, edge-wise 曲げ, 捻りを考慮し, ラジアルセクタ型 FFAG 加速器用マグネットの概念設計を行った。今後は, 今回のマグネットと共に, 別タイプの FFAG 加速器用マグネットについても検討も行っていく。

謝辞

本研究は, 産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】として, 科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

参考文献

1. K. R. Symon, et al.: "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators", Phys. Rev., vol. 103, no. 6, pp. 1837-1859 (1956)
2. S. Russenschuck: "Field computation for accelerator magnets", WILEY-VCH (2010)

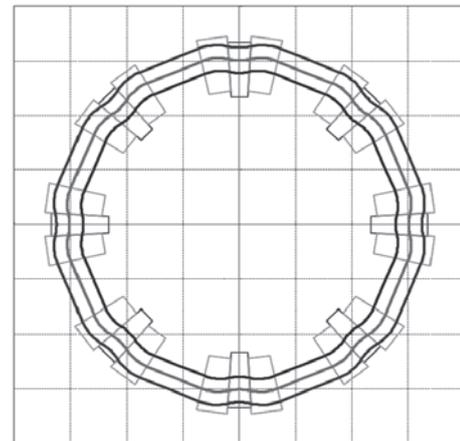


Fig. 1 Conceptual view of beam orbit of FFAG accelerator.



Fig. 2 Shape of designed magnet.

Table 1 Outline of design of magnet

Radius of magnet bore	0.70 m
Inner radius of iron yoke	0.85 m
Beam excursion	0.72 m
Distance between center of accelerator and center of magnet	4.3 m
Magnetic field at center of magnet	2.55 T
k value	9
Width of coated conductor	3 mm
Thickness of coated conductor	0.2 mm
Average current density of coated conductor	< 500 A/mm ²

高温超伝導テープ線材で巻かれた2極マグネットの多極磁場測定

Magnetic field harmonics measurements of dipole magnet wound with high Tc superconductor tapes

雨宮 尚之, 岡田 奈々, 高橋 慶多, 中村 武恒(京大・工); 荻津 透(KEK); 小柳 圭, 吉行 健(東芝)
 AMEMIYA Naoyuki, OKADA Nana, TAKAHASHI Keita, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University);
 OGITSU Toru (KEK); KOYANAGI Kei, YOSHIYUKI Takeshi (Toshiba)
 E-mail: amemiya@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

加速器用マグネットへの高温超伝導線材の適用を目指した研究開発を進めている。今回は、高温超伝導テープ線材で巻かれた2極マグネットの多極磁場成分について実験的に調べた。今回は、特に励磁履歴の影響、Bi系多芯線材で巻かれたコイルとRE系薄膜線材で巻かれたコイルの比較について報告する。

2. 実験方法

測定対象コイルを液体窒素で冷却し、回転ピックアップコイル法で多極磁場測定を行った。マグネットボア中でピックアップコイルを回転させ、誘導電圧のピックアップコイル角度依存性から、Fourier級数展開により多極磁界成分を求めた。

3. Bi系多芯線材コイルの実験結果

Fig. 1に、電流を0 A→+50 A→0 A→-50 A→0 Aと変化させ、6極磁場成分の値を電流値に対してプロットした。このプロットにはヒステリシスが見られており、これは遮蔽電流(磁化電流)の影響である。

次に、通電電流を0 A→30 A(保持、1st)→0 A(保持)→50 A(保持、1st)→0 A(保持)→30 A(保持、2nd)→0 A(翌日まで保持)→30 A(保持、3rd)→0 A(保持)→50 A(保持、2nd)→0 A(保持)→50 A(保持、3rd)と変化させて多極磁場成分を測定した。各電流値での保持時間は原則として1時間である。このときの6極磁界成分の時間変化をFig. 2に示す。いずれの場合も、6極磁場成分は緩やかに変化しているが、これは遮蔽電流(磁化電流)が減衰するためである。特に50 Aの方が遮蔽電流の減衰による6極成分の変動は大きい。また、30 A保持時も、50 A保持時も、初回保持時と2回目以降で6極磁場成分の大きさが異なっていることが特徴的である。

4. RE薄膜線材コイルの実験結果(Biコイルとの比較)

通電電流を0 A→30 A(保持、1st)→0 A(保持)→50 A(保持、1st)→0 A(保持)→30 A(保持、2nd)と変化させて多極磁場成分を測定した。各電流値での保持時間は原則として1時間である。このときの6極磁界成分の時間変化をFig. 3に示す。Fig. 2のBi系線材コイルの場合に比べ、6極磁場成分の時間変動が小さいことがわかる。Bi系線材の場合、特に励磁直後は、遮蔽電流はフィラメント間の銀母材を渡って流れると考えられる。このため銀の抵抗により遮蔽電流の減衰が早く、6極磁場成分の時間変化も比較的大きいものと考えられる。これに対し、RE薄膜線材の場合、遮蔽電流は超伝導層の中のみを流れるため、その減衰は非常にゆっくりで、遮蔽電流の減衰による発生磁場の変動は小さいものと考えられる。

5. まとめ

遮蔽電流による多極磁場成分は励磁履歴に依存するが、初期励磁を除き再現性が高い。RE薄膜線材コイルの方がBi系線材コイルより遮蔽電流減衰による磁場変動は小さい。

謝辞

本研究は、産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】として、科学技術振興機構からの委託により実施したものである。

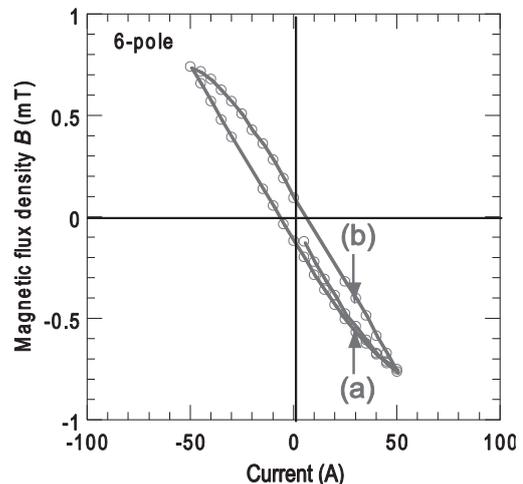


Fig. 1 Hysteresis loop of 6 component of magnetic field in Bi coil.

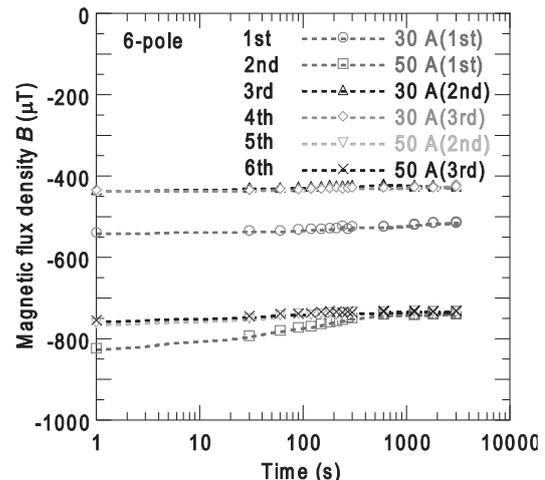


Fig. 2 Temporal evolutions of multi-pole components in Bi coil.

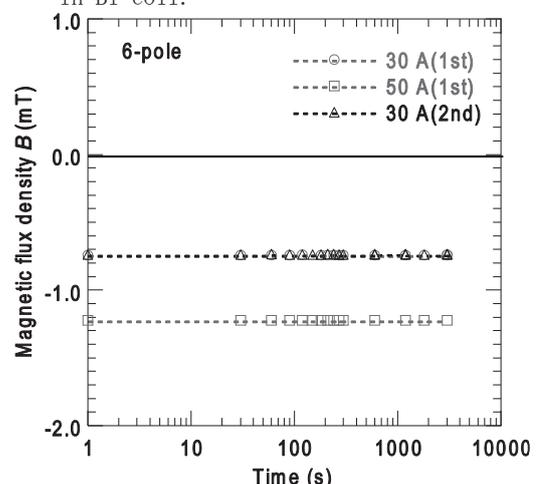


Fig. 3 Temporal evolutions of multi-pole components in coated conductor coil.

サーフェイス・ワインディング法で巻かれた超伝導2極マグネットの多極磁界測定

Measurement of magnetic field harmonics in superconducting coil wound by surface winding method

水田 慎吾, 雨宮 尚之, 中村 武恒(京大)

荻津 透(KEK); 折笠 朝文, 来栖 努(東芝); 尾花 哲浩(NIFS); 野田 耕司(放医研)

MIZUTA Shingo, AMEMIYA Naoyuki, NAKAMURA Taketsune (Kyoto University); OGITSU Toru (KEK)

ORIHARA Tomohumi, KURUSU Tsutomu (Toshiba); OBANA Tetuhiro (NIFS); NODA Koji (NIRS)

E-mail shin03zeiss@yahoo.co.jp

1. 研究の背景

超伝導線を用いた磁界精度の高い加速器用マグネットの製作方法として東芝でサーフェイス・ワインディング法と呼ばれる方法が、フェルミ国立加速器研究所で”direct wind”[1]と呼ばれる方法が開発されている。この方法は、一本の線材(導体)を巻枠表面に配置し樹脂で固定し、さらにその上からGFRPシートを重ね、同様の過程を繰り返すことによりコイルを製作するものである。

この方法を用いることで自由な導体配置が可能となり、所望する多極成分を発生するマグネットを設計できる。しかしサーフェイス・ワインディング法で実際に積層巻線を行ったときに、導体配置の誤差が発生磁界に与える影響は十分調べられていない。

2. 実験方法

今回はNbTi線材を用いて製作した2極マグネットの発生磁界を測定し、設計データから解析した理論値との比較によりその磁界精度について検討した。Fig. 1に示した2極マグネット内部でピックアップコイルを回転させ、発生する誘導電圧の波形を解析することによりマグネットが発生する磁界の多極成分を導出した。測定は4層、10層、16層といった各積層過程においてマグネットの中心とそこから120 mm軸方向にずらしたマグネット端部の2箇所で行った。

またマグネットの導体配置の設計データからBiot Savartの法則によりマグネット内部での磁界分布を計算した。その中でピックアップコイルを回転させた場合に発生する誘導電圧の理論値を計算し、実験と同様の解析を行うことにより発生する多極磁界成分の理論値を導出し、その結果を測定値と比較することにより発生磁界精度の評価を行った。

3. 結果と考察

マグネット中心、端部での多極磁界成分の測定結果と解析値を求め、それぞれノーマル2極成分(スキュー2極成分は0)で高次成分を規格化し測定値と解析値の差を誤差としてそれに 10^4 を乗じたものを積層段階ごとに比較した。Fig. 2にはマグネット中心での誤差、Fig. 3にはマグネット端部での誤差を示した。今回行った4層、10層、16層での積層過程ではマグネット端部で6極磁界成分の誤差が大きい。積層過程での導体配置については特にそのマグネット端部での導体配置の精度向上が必要である。また直線部の誤差は 10^{-3} 以下に抑えられておりこの方法である程度の磁界精度は保証されることが分かった。今回は3つの積層段階のみの結果でありその後の積層過程において系統的な誤差が現れたならばそれについて議論していく必要がある。また今後、高温超伝導線材を用いたマグネットにこの方法を適用することも検討している。

本研究の一部は、科学技術振興機構の産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】の支援によって行われた。

参考文献

[1] B. Parker and J. Escallier, BNL, Upton, NY 11973, U. S. A. :”SERPENTINE COIL TOPOLOGY FOR BNL DIRECT WIND SUPERCONDUCTING MAGNETS” Proc. of PAC 2005.

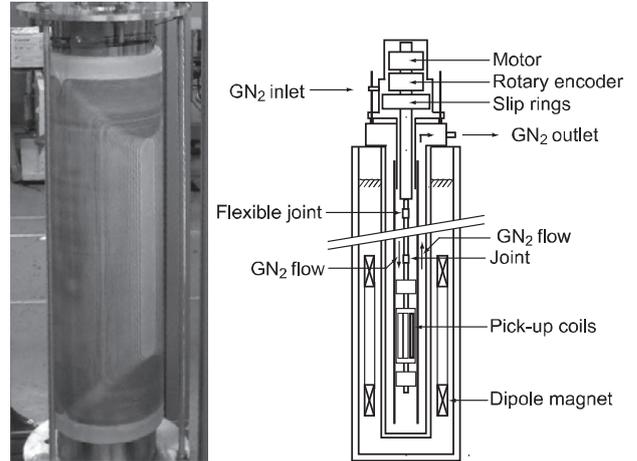


Fig. 1 サーフェイス・ワインディング法により製作されたマグネット(左)と実験装置の概念図(右)

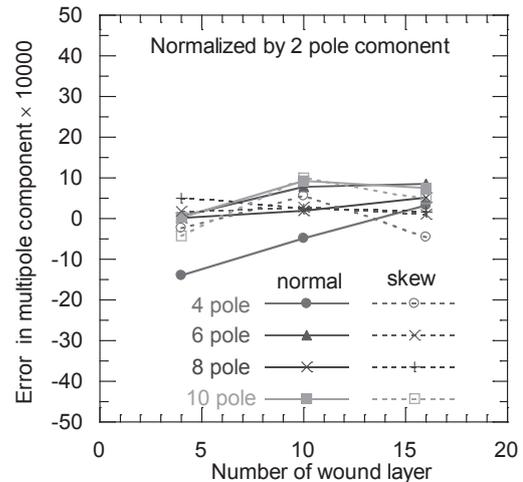


Fig. 2 マグネット直線部における測定値と解析値の誤差

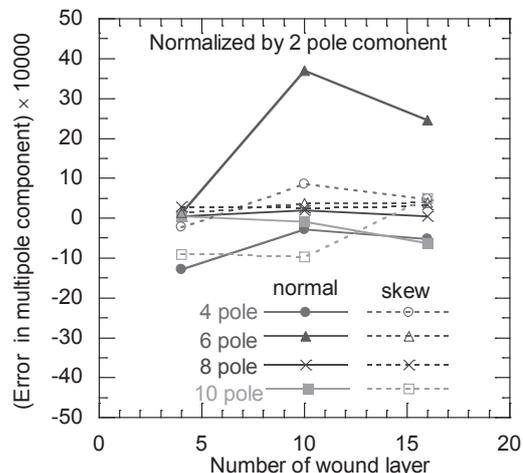


Fig. 3 マグネット端部における測定値と解析値の誤差

ミュオンビームライン用超伝導ソレノイドのクエンチプロテクション

Quench protection of superconducting solenoid for muon beamline

足立 泰平(東大); 池戸 豊, 榎田 康博, 中本 建志, 佐々木 憲一, 荻津 透, 山本 明,
ストラッサー パトリック, 下村 浩一郎, 三宅 康博, 吉田 誠(KEK); 久野 良孝(阪大)

ADACHI Taihei (The Univ. of Tokyo); IKEDO Yutaka, MAKIDA Yasuhiro, NAKAMOTO Tatsushi,
SASAKI Kenichi, OGITSU Toru, YAMAMOTO Akira, STRASSER Patrick, SHIMOMURA Koichiro,
MIYAKE Yasuhiro, YOSHIDA Makoto(KEK); KUNO Yoshitaka (OSAKA Univ.)

E-mail: adachit@post.kek.jp

1. はじめに

J-PARCにて建設中の Super-Omega ミュオンビームライン用の超伝導ソレノイド[1]は、クエンチ保護として、銅線をヒーターとして巻き、クエンチ発生時にコイル電流を導いて、ソレノイド全体に強制的なクエンチを起こさせるという手法を採用する。このヒーターについてモデルコイルを用いた試験と、それに基づいた計算により、安全性を調べた。

2. 超伝導ソレノイド

Super-Omega ミュオンビームラインで使われる超伝導ソレノイドは、長さ約8m、内径0.3~0.4 mで、前後に短いソレノイドを7個ずつ並べた45度の湾曲部分を持ち、中央は約6mの直線型のソレノイドとなっている。すべてのソレノイドは、低温で直列に接続されており、小型冷凍機からの伝導冷却によって冷却される。Table 1に、テストコイルと最終デザインの諸元を示す。

3. クエンチ保護

クエンチ保護の概念図を Fig. 1 に示す。クエンチ検出時には、電源を遮断することでコイル電流をヒーターへと導き、個々のヒーターがそれぞれのコイルを加熱し強制的なクエンチを起こさせる。コイルへのヒーターの組み込み方を Fig. 2 に示す。対地絶縁(G-10)、ヒーター線、ポリイミドフィルム、超伝導線の順に巻かれており、ギャップは全てエポキシ樹脂が充填されている。

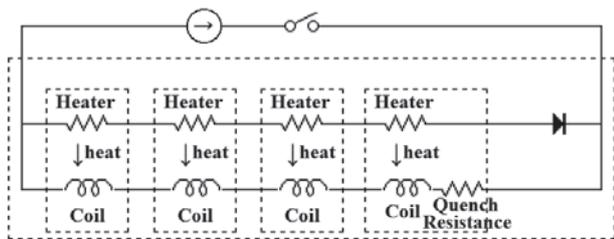


Fig. 1: Diagram of protection heater circuit.

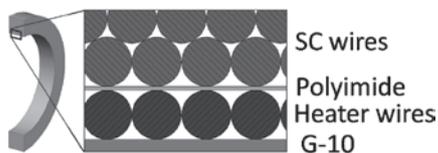


Fig. 2: Cross-section of the quench-back heater.

4. テストコイルを用いた試験

ヒーターがクエンチを誘発するのにかかる時間と、径方向にクエンチが伝搬し電流が減衰する様子を調べる為、テストコイルによる評価試験を行った。試験では、コイルに通電中に電源を遮断する事によってヒーター回路にバイパス電流を誘起し、クエンチを発生させた。設計電流270Aでの遮断試験では、クエンチの誘発時間は60 ms、電流減衰の時定数は、1.5 sであった。

Table 1: Design parameters of the test and production coils.

Parameter	Test coil	Production coil
SC wire Conductor	NbTi-Cu	NbTi-Cu
Diameter	1.3 mm	0.87 mm
Heater Conductor	Cu	Cu
Diameter	1.3 mm	1.1 mm
Interlayer insulation	PI	PI
Glue	Epoxy	Epoxy/BT
Coil Length	47mm	~8 m
Thickness	35 mm	13~30 mm
Inner Radius	195 mm	160~190 mm
Turns	1015	1.6E5
Wire length	1.4 km	180 km
Inductance	0.75 H	385 H
Temperature	3.2 K	<5 K
Operational current	270 A	83 A

5. 解析と実機への適応

シミュレーションコード QUENCH[2]を用いて、クエンチ伝播を計算し、試験による電流減衰の実験結果と整合するよう、径方向の熱伝導率を変化させて評価したところ、線材間絶縁厚さと絶縁物性値から求めた値の1/4程度であった。これを界面の熱抵抗等の実効値であるとして、実機の場合でも同様な実効的な特性を有すると仮定し、実機のクエンチ保護時の電流減衰を評価した。結果を、Fig. 3に示す。コイルの最高温度は約60Kであった。実際の擾乱によるクエンチからの保護の場合、クエンチ検出や遮断、強制クエンチ誘発にタイムラグが存在するが、それを考慮に入れた場合でも、コイル最高温度は70 K程度と評価された。

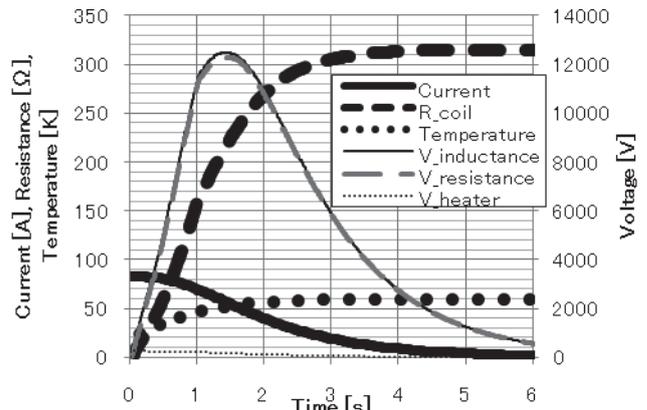


Fig. 3: Calculated current decay of Production Coil.

参考文献

- Y. Miyake, et al.: MUSE, AIP Conf. Proc. (2009) P.1104
- WILSON. M. N.: RHEL/M151 (1968)

保冷システムにおける高温超電導コイルの伝熱解析と実験結果の比較

Comparison of heat transfer between analysis and experimental result on HTS coil of cold storage system

岩崎 高歩,岡村 哲至(東工大);長嶋 賢,水野 克俊(鉄道総研)

IWASAKI Takaho, OKAMURA Tetsuji (Tokyo Tech);

NAGASHIMA Ken, MIZUNO Katsutoshi (RTRI)

E-mail: iwasaki.t.ah@m.titech.ac.jp

1. はじめに

希土類系の高温超電導コイルは巻き圧方向と巻き線方向の熱伝導率に異方性があり、また高温超電導コイルは熱伝導特性が悪いと予測される。そのため、高温超電導コイルは均一な温度分布を持たないことが予想される。そのような問題点に対し、本研究では実験と解析の両面から評価した。

2. 実験方法

本実験ではイットリウム系超電導コイルを用いた。コイルの形状は内径45mm、外径75mm、直線部150mm、厚み5mm、ターン数139ターンのレーストラック型コイルである。コイルはFig.1に示すように、a.下部の外側、b.下部の内側、c.中部の外側、d.中部の内側、e.上部の外側、f.上部の内側の計6ヶ所で測定を行った。実験条件としては、測定点eが30Kになるよう、冷凍機を調整し、コイル下部に取り付けられたヒーターの入熱量によるコイルの温度分布を観察した。

ヒーター以外の熱侵入に関しては、真空容器内のふく射シールドの温度を25K付近に固定したため、熱ふく射は考慮する必要がないと考えられる。

3. 二次元伝熱解析モデル

本研究では実験で使用した0.4kgの高温超電導コイルを、モデル化して二次元伝熱解析を行った。計算モデルはFig.2に示すように、レーストラック型のコイルを長方形に近似し、温度分布を観察した。物性値としては、YBCO、ハステロイ、エポキシ樹脂と銅の比熱、密度、熱伝導率を全体に占める割合を考慮し、合成したものを用いた。境界条件は、両端のセルが冷凍機と繋がっているとし、両端の温度を固定した。また、実験同様、熱侵入は下部のヒーターからのみとし、下部のセルからの入熱量によるコイルの温度分布を計算した。

4. 実験と解析結果の比較

Fig.3、Fig.4に解析結果と実験結果を示す。Fig.3より超電導コイルは巻き厚方向より巻き線方向の熱伝導率ははるかに大きく、コイルの内側と外側で温度差がついているのがわかる。Fig.3の解析結果も同様の結果を示している。解析結果と実験結果を比較すると、解析結果の方がコイルの温度差が小さくなっている。これは、解析モデルと実際のコイルの熱伝導率の相違性と、計算モデルを長方形に近似したことにより、発生した誤差であると考えられる。

5. 結論

本研究では、保冷システムにおける高温超電導コイルの伝熱解析と実験を行うことにより、解析により得た、巻き線方向と巻き厚方向の熱伝導率が約千倍違うという結果の信憑性を、実験によって確かめることができた。

参考文献

1. K. Mizuno, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 79 (2008) p.139

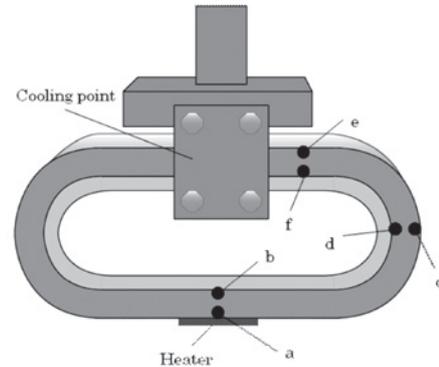


Fig.1 Measure Point of Superconducting Coil

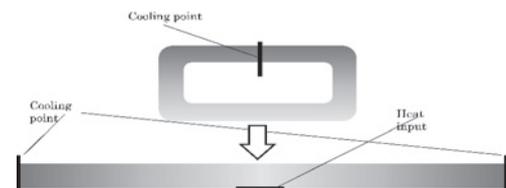


Fig.2 Two-dimensional analytical model

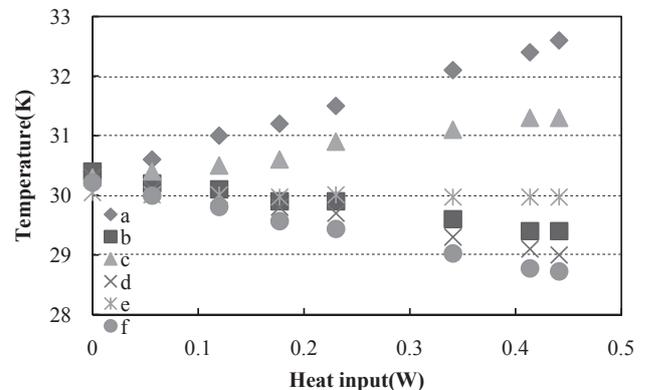


Fig.3 Experiment result with measure point e fixed to 30K

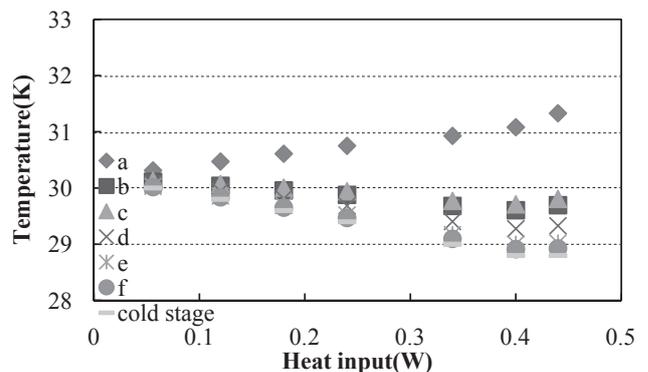


Fig.4 Analysis result with both ends fixed to cold stage temperature

高温超電導磁石内部のアウトガス成分分析 Analysis of outgas component inside HTS magnet

水野 克俊, 小方 正文, 長嶋 賢(鉄道総研); 平井 靖夫, 高橋 貞充, 岩本 慎平(エア・ウォーター)
MIZUNO Katsutoshi, OGATA Masafumi, NAGASHIMA Ken (RTRI);
HIRAI Yasuo, TAKAHASHI Sadamitsu, IWAMOTO Shinpei (AWI)
E-mail: mizuno59@rtri.or.jp

1. はじめに

現在開発が盛んに行われている高温超電導線を用いれば 50 K での磁石運用も十分に可能であり, 液体ヘリウム温度域と比較して磁石の構成材料の比熱が 100 倍以上になるため熱的に極めて安定である。鉄道総研ではこの特徴を活かして, 冷却系が分離可能で, 熱容量だけで長時間低温が維持できる高温超電導磁石(以下モバイルマグネット)の開発を行っている[1]。モバイルマグネットの実現においては, 高い断熱性を確保することが重要な課題である。モバイルマグネットの開発過程で, 冷却系分離後の超電導コイル温度上昇に伴いアウトガスが発生し, 大きな熱侵入増が引き起こされることが判明した。活性炭を磁石内部に配置することにより, ガス伝導を大幅に低減できることが明らかになっているものの[2], アウトガスの成分や活性炭の能力については不明な点が多い。加えて, モバイルマグネットに限らず, 運用温度によっては常時冷却型の超電導磁石においてもアウトガスは大きな問題となりうる。そこで今回, アウトガスの成分分析を行ったので, 結果を報告する。

2. 試験方法

超電導コイルを模擬した銅の塊を内蔵した保冷特性評価用の試験装置と, 高温超電導コイルを内蔵したモバイルマグネットを評価対象とした。モバイルマグネット内部には活性炭を設置した。試験手順としては, まずターボ分子ポンプで 10 時間以上真空排気を行ない, その後冷却を開始した。そして冷却完了後, 自然昇温に伴うアウトガスの放出を連続的に計測した。

アウトガスの成分分析には Canon ANELVA(株)製 M-QA200TS 四重極型質量分析計を使用した。Fig.1 に計測対象の一つであるモバイルマグネットを示す。

3. アウトガス計測結果

Fig.2 に保冷特性評価試験装置におけるコイル(模擬体)の温度とアウトガス成分の関係を示す。コイル温度が 36 K を上回ったところで, 真空度が質量分析計の計測上限 1.2×10^{-2} Pa を超えて計測を終了している。32 K 以下ではアウトガスの成分は水素が支配的であったが, 32 K を超えると窒素が発生し, 真空度が急激に悪化している。窒素の飽和蒸気圧曲線も 30 K 近傍で急激に立ち上がる特性があるので, 温度上昇によるクライオポンプ効果の低下が窒素発生の原因であると考えられる。

Fig.3 にモバイルマグネットにおける, コイル温度に対するアウトガス成分の変移を示す。モバイルマグネットと保冷特性評価試験装置の相違点は, 活性炭を有していることである。活性炭の効果により, 50 K を超えるまで冷却系分離後の 2×10^{-3} Pa を維持している。50 K を超えての圧力上昇は水素によるものであり, 水素に対する活性炭の吸着力は 50 K を超えると大幅に低下するものと考えられる。

本研究は国土交通省の国庫補助金を受けて実施した。

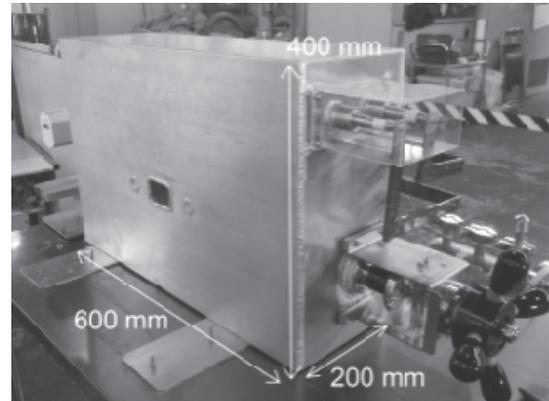


Fig.1 Mobile magnet capable of separating cooling system.

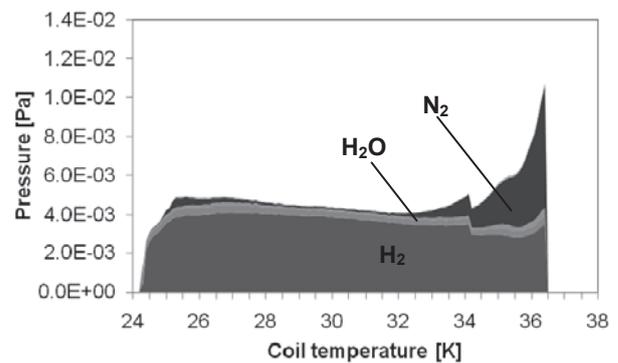


Fig.2 Shift of outgas component with respect to dummy coil temperature inside cold storage apparatus.

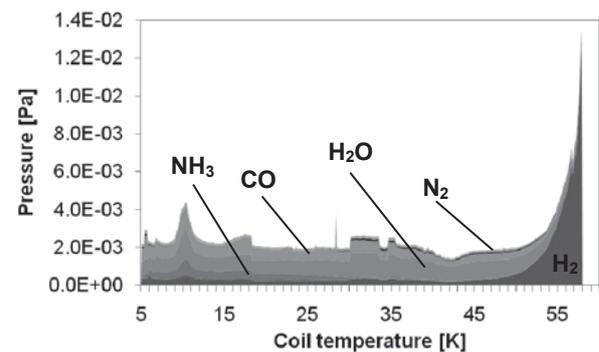


Fig.3 Shift of outgas component with respect to HTS coil temperature inside mobile magnet.

参考文献

1. M. Ogata, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.196
2. Y. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.84

SME S コイル用高効率伝導冷却システムの開発

Development of high-efficient conduction cooling system for SMES coil

平野 直樹, 玉田 勉, 式町 浩二, 成瀬 光人, 長屋 重夫(中部電力)

HIRANO Naoki, TAMADA Tsutomu, SHIKIMACHI Koji, NARUSE Mitsuhiro, NAGAYA Shigeo(Chubu Electric Power Co.)

E-mail: Tamada.Tsutomu@chuden.co.jp

1. はじめに

イットリウム系超電導線材（以下、Y系線材という。）においては、従来の金属系よりも高い温度で超電導状態となることから、我々は、Y系線材を用いた SMES 用超電導マグネットの冷却方法として、取り扱いが容易な冷凍機伝導冷却システムによる冷却方法について検討を進めている。中でも冷凍機からコイルまでの熱勾配が発生しにくく、コイル全体を均等に冷却が可能なガス循環による冷却方式について、模擬発熱体による冷却試験を実施し、解析値と同等な冷却性能が得られていることを確認している[1]。今回、Y系線材を使ったコイルを製作し、コイル及び冷却システムの冷却性能、伝導冷却下での電気絶縁性能およびコイル通電性能を把握したので報告する。

2. 実験方法

Y系線材をシングルパンケーキ状に巻き、絶縁コーティングしたものを2層重ね、その表面に冷却配管を埋め込んだ伝熱板を張りつけた。試験に用いたコイルの断面をFig.1に示す。これをシールド容器の中に設置し、冷却配管の中を冷凍機で20K以下に冷却したヘリウムガスを循環することでコイル全体を冷却した。冷凍機はコイル冷却用50W@20Kの冷凍機1台と電流リード及びシールド冷却用175W@65K冷凍機2台でシステム全体を冷却した。Fig.2に実験装置全体の概略図を示す。

最初に、コイルを約20Kに冷却した状態で、電流リードに13kVの直流電圧を印加し、コイル及び冷却配管等システム全体の絶縁耐電圧性能について検証した。なお、試験方法は直流機JEC-2120-2000に依り、緩やかに昇圧し、目標電圧13kVを1分間印加した。また、運用においてコイルへの充放電を行うことを考慮し、印加電圧については正極と負極の両極において確認した。

次に、コイルを約20Kに冷却した状態でコイルの通電性能を確認するとともに、電流リードに外部電源として充放電ができるマルチセル変換器を接続し、コイルの充放電性能を検証した。

3. 結果

模擬発熱体を用いた検証と同様に、実験装置の各部に取り付けた温度センサでコイルが約20Kに冷却できていることを確認した上で、コイルに直流+13kVを1分間、直流-13kVを1分間印加し、異常のないことを確認した。

次に、電流リードに外部電源のマルチセル変換器からのケーブルを接続し、コイルを約20Kに冷却した状態で、電源からコイルへの電流を制御しながら通電し、10secサイクルの100回以上の繰返し充放電をさせたところ、Fig.3に示す結果が得られ、制御通りコイルの充放電性能を確認することができた。

4. まとめ

Y系線材を用いたSMESコイルの冷却方式として、ガス循環方式による伝導冷却方式について、実験により検証し、コイルの冷却性能、電気絶縁性能、通電・充放電性能について確認することができた。

5. 謝辞

本研究は、NEDOの委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環で実施したものである。

参考文献

[1] T. Tamada et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.83 (2010) p.71

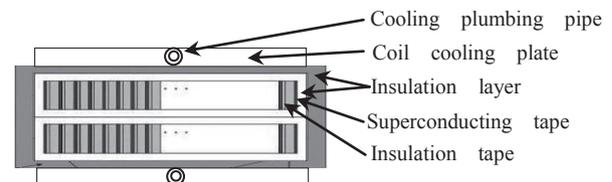


Fig. 1 A cross section of substance coil

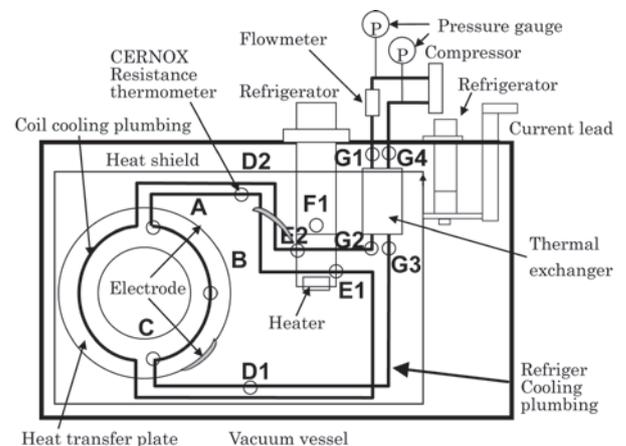


Fig. 2 Outline drawing of the experimental device

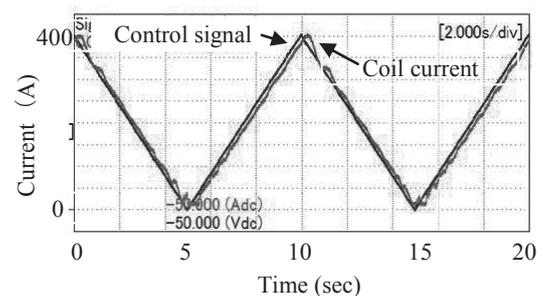


Fig. 3 Current waveform

POLARBEAR II の冷却システム検討 Cooling system design of POLARBEAR II

都丸 隆行 (KEK)、高田 卓 (筑波大学)、松村 知岳、田中 賢一、鈴木 純一、羽澄 昌史 (KEK)
Takayuki TOMARU(KEK), Suguru TAKADA(U. of Tsukuba), Tomotake Matsumura, Ken-ichi TANAKA, Jun-ichi SUZUKI
and Masashi HAZUMI (KEK)
E-mail: takada@kz.tsukuba.ac.jp

1. 概略

現在、計画されている宇宙マイクロ波背景放射偏光観測のためのミリ波望遠鏡 POLARBEAR II の冷却システムについて報告する。POLARBEAR II は、チリ・アタカマ高原 (標高 5100 m) に設置されるミリ波望遠鏡である。超高感度の観測を実現するため、超伝導 TES (Transition Edge Sensor) を使用する。そのため、冷却システムは、室温から焦点面 0.1 K までを機械式冷凍機により構成する必要がある。本計画では、ADR (断熱消磁冷凍機) の開発を含めた、機械式冷却システムを検討している。

2. POLARBEAR II とは?

POLARBEAR II は、宇宙マイクロ波背景放射の B モードという特殊な偏光パターンを観測するミリ波望遠鏡計画であり、原始重力波起源、重力レンズ効果による B モード偏光の発見を目指している。検出器には、超伝導検出器 TES (UC Berkeley - KEK 開発したもの) を用いる。世界最高感度を達成するため、約 6000 個がアレイ化され、約 $\phi 400$ mm の大きな検出面を 0.1 K に冷やす必要がある。

本プロジェクトの物理的な目標が挑戦的であるのはさることながら、 $\phi 400$ mm の大焦点面を 0.1 K まで冷やす計画は過去になく、低温工学の挑戦でもある。

3. 冷凍機チェーン

本実験において、ミリ波望遠鏡はチリ・アタカマ高原に設置されるため、現地でのメンテナンスが難しい。また、Fig.1 のように、クライオスタットが望遠鏡に組み込まれるため、望遠鏡が傾きを換えることに追従して、クライオスタット全体が $\pm 40^\circ$ の範囲で傾く。冷凍チェーンは重力依存性が小さく、現地でのメンテナンスが少ない物を選ぶ必要がある。

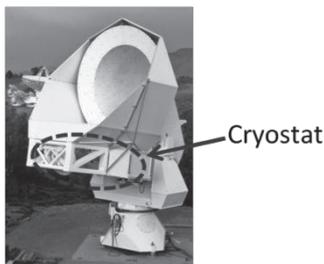
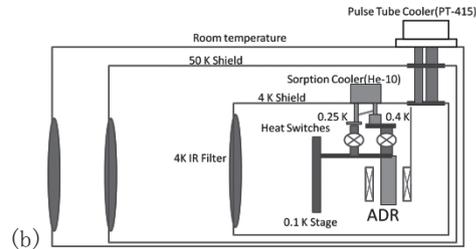
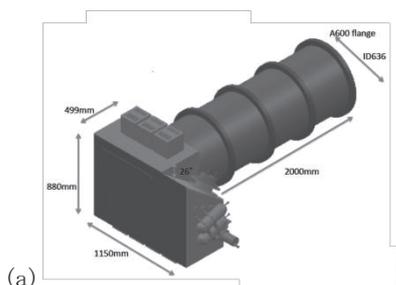


Fig.1 A picture of Huan Tran Telescope for CMB polarization measurement



Figs. 2 rough sketch of POLARBEAR II: (a) CAD data (b) schematic illustration of cooling chain

このため、冷凍チェーンには液体ヘリウムを使わず、機械式冷凍機を組み合わせた物を使用する。Fig.2(a), (b) に概略図を示す。使用する冷凍機は、パルス管冷凍機 (室温 ~ 4 K)、多段ソーブション冷凍機 (4 ~ 0.25 K)、一段の断熱消磁冷凍機 (ADR: ~ 0.1 K) である。各設計性能などの詳細については、当日発表する。

4. 開発状況

望遠鏡の傾きを模擬出来る冷凍機チェーンのテスト用クライオスタットを製作し、パルス管冷凍機、ソーブション冷凍機における冷凍能力の角度依存性を調べている (Fig. 3)。本計画で使用するパルス管冷凍機については、 $\pm 40^\circ$ の範囲では最低到達温度が大きく変わらないことを確認している。また、ADR については、常磁性塩に CPA (カリウムクロム明礬) を使用し、プロトタイプ製作を進めている。

謝辞

本検討は、5 カ国 10 研究機関の POLARBEAR-collaboration の協力の元、行われた。

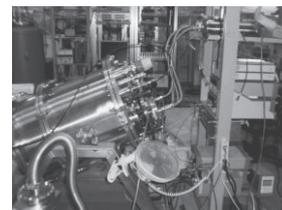


Fig.3 Performance test of pulse tube cryocooler with tilting angle 50°

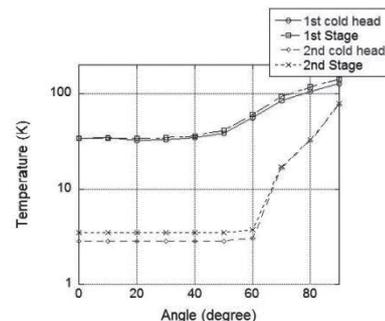


Fig.4 Lowest temperature of pulse tube cryocooler with tilting angle

液体水素ステーションに併設した SMES-燃料電池を用いた 風力エネルギー変動補償方法の検討

SMES-FC System Combined with Liquid Hydrogen Vehicle Station to Compensate Fluctuating Wind Energy

岩崎 辰哉, 天田 博仁, 中村 隆人, 孫 敬雨, 津田 理, 宮城 大輔, 濱島 高太郎 (東北大学);
新富 孝和 (日本大学); 榎田 康博 (高エネルギー加速器研究機構); 宗像 浩平, 三輪 佑太 (岩谷産業)

IWASAKI Tatsuya, AMATA Hiroto, NAKAMURA Takahito, SON Kyoungwoo,
TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke, HAMAJIMA Takataro (Tohoku University);

SHINTOMI Takakazu (Nihon University); MAKIDA Yasuhiro (High Energy Accelerator Research Organization);
MUNAKATA Kohe, MIWA Yuta (Iwatani Corporation)

E-mail: t-iwasaki@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

液体水素はその大きなエネルギー密度から次世代の自動車の燃料として期待されている。これらの自動車の普及は燃料補給を行うための液体水素ステーションの整備と並行して進むことが予想される。液体水素は 20.3 K と非常に低温であるため、例えば超電導磁気エネルギー貯蔵装置(SMES)の冷媒として使用した場合、液体窒素を冷媒として使用するよりも小型化かつ大容量化が可能となるなど多くのシナジー効果が得られる。

本研究では、SMES、燃料電池(FC)、電気分解装置(EL)、液体水素ステーション、再生可能エネルギー、電力系統で構成される先進超電導電力変換システム(ASPCS)を提案する。また、再生可能エネルギーとして風力エネルギーを用いた場合の変動補償を本システムで行い、システム全体の効率を評価した。

2. システム構成と変動補償方法

本研究にて提案する ASPCS の概念図を Fig. 1 に示す。風力などの再生可能エネルギーから得られた電力は変動が大きいため、電力貯蔵装置による変動補償が必要となる。FC は応答に分オーダーの遅れがあるため、風力発電出力の平均値を担当し、残りの秒オーダーの急激な変動を SMES が担当する。このようにして電力系統に連系して一定電力を輸送する。

今回の出力変動補償を行う際に遅れ時間分に相当する未来の出力トレンド予測をする必要がある。そこで状態空間モデルを逐次更新していくカルマンフィルタを用いて長期予測を行う。今回は FC の時間遅れを考慮して 50 秒の予測をする。

3. システム効率

本システムの評価を行うため、簡単な効率計算を行った。再生可能エネルギーの出力とその平均予測値の差分を入出力する SMES の効率は 95%、需要に対して余剰な電力を吸収する EL の水素エネルギーへの変換効率は 80%、需要電力の不足分を供給する FC の発電効率は 40%の一律と仮定する。

解析に利用したある 1 日の風力発電出力波形を Fig. 2 に示す。なお定格出力は 5 MW であり、1 日の平均出力は 3.03 MW である。

4. 結果・緒言

Fig. 3 は供給目標電力によって効率がどのように変化するかを示している。グラフから供給電力が約 2.5 MW の時システム効率が最大であり、75%以上の効率が得られることがわかる。これは EL と FC の効率の積 32%より非常に大きい。この結果は SMES と FC を直接電力出力と組み合わせることのメリットを示している。

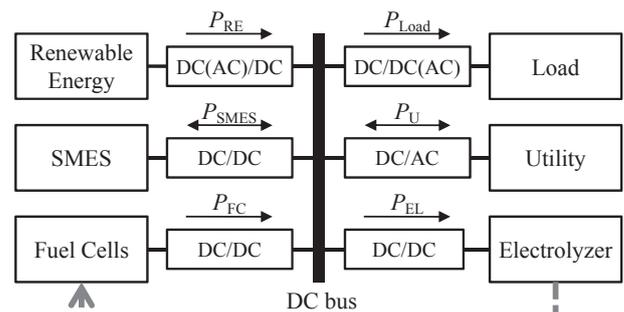


Fig. 1 Advanced Superconducting Power Conditioning System (ASPCS)

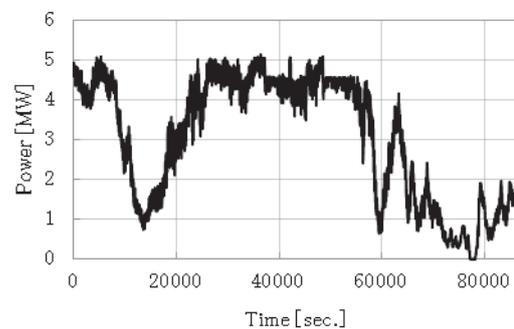


Fig. 2 Wind turbine output

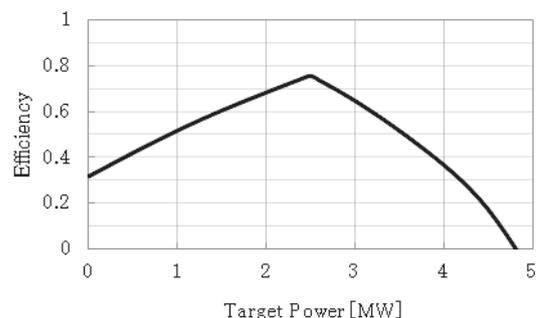


Fig. 3 Efficiency of ASPCS

参考文献

1. T. Nakayama, et al.: "Optimization of SMES Compensation Capacity for Stochastic Power Using a Kalman Filter", TEION KOGAKU 45(2010)
2. H. Nakamura, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.190

LCGT 熱シールド用金属の低温における波長 $10\mu\text{m}$ での反射率測定

Reflectivity measurements of metals for LCGT thermal radiation shields in cryogenic temperature at a wavelength of $10\mu\text{m}$

榎原 裕介, 黒田 和明, 大橋 正健, 高橋 竜太郎, 三代木 伸二, 内山 隆 (東大宇宙線研); 齋藤 芳男, 鈴木 敏一, 山本 明, 春山 富義, 木村 誠宏 (KEK); 三尾 典克, 森脇 成典, 大前 宣昭 (東大新領域); 武者 満 (電通大)

SAKAKIBARA Yusuke, KURODA Kazuaki, OHASHI Masatake, TAKAHASHI Ryutaro, MIYOKI Shinji, UCHIYAMA Takashi (ICRR,UT); SAITO Yoshio, SUZUKI Toshikazu, YAMAMOTO Akira, HARUYAMA Tomiyoshi, KIMURA Nobuhiro (KEK); MIO Norikatsu, MORIWAKI Shigenori, OHMAE Noriaki (GSFS,UT); MUSA Mitsuru (UEC)

E-mail: ysakaki@icrr.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

アインシュタインが一般相対論で予言した重力波を直接検出するためには、鏡の微小な変位 (100 Hz で $\sim 10^{-20}\text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$) を検出することが必要であるが、鏡の熱振動が雑音になるため、大型低温重力波望遠鏡 (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope, LCGT) では、鏡を低温 ($\sim 20\text{ K}$) にすることでこの雑音を低減する。しかし、冷却能力には限界があり、低温系に外部 (常温) から入ってくる熱放射を低減する必要がある。そのため、熱シールドが必要であり、その候補としてアルミニウムを蒸着したマイラーフィルムを 40 枚程度重ねた Super Insulator (SI) がある。しかし、実効的な表面積が大きいことと、マイラーという有機物質を用いているため、表面からの脱ガスが大きく、真空圧力を上昇させ屈折率の変動や鏡表面の汚染といった問題につながる可能性がある。

実効的な表面積を抑え、有機物質を用いないシールドとして、熱放射率 (emissivity) ϵ の低い金属を数枚程度自立的に設置するという方法がある。この方法を用いるためには、実用的な純度、表面処理の金属の低温での熱放射率を知る必要があり、今回測定した。

2. 測定方法

炭酸ガスレーザー (波長 $\lambda = 10.59\mu\text{m}$) を用いて反射率 r_λ を常温から低温までの温度の関数として測定した。さらに、キルヒホッフの法則

$$\epsilon_\lambda = 1 - r_\lambda$$

から単色放射率 ϵ_λ が求まり、金属表面を灰色体と仮定すると $\epsilon = \epsilon_\lambda$ となる。この測定の際に、サンプル表面にガスが吸着するのを防ぐため、ヒーターでサンプルを熱することで常にサンプルが周囲より高温になるようにして冷却、昇温を繰り返し行い測定した。

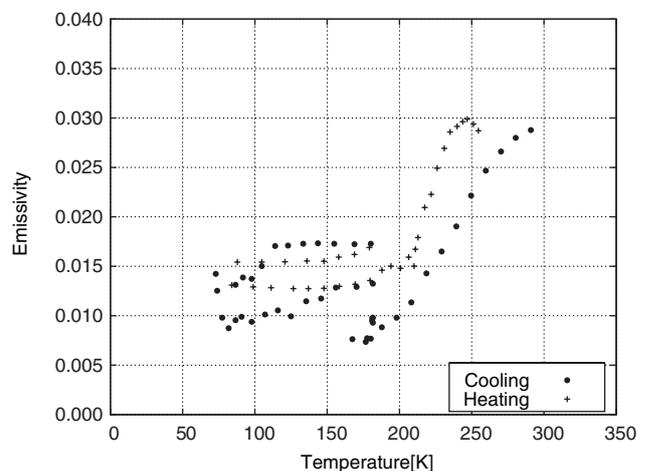


Fig. 1 Relationship between the temperature and the emissivity of the copper sample. Plural plots at a certain temperature represent the results of repetitive measurements.

3. 結果

低温での銅サンプルの測定結果を Fig. 1 に示す。各測定結果が測定誤差 0.01 の範囲内で一致し、サンプルの反射率と考えると差し支えない結果を得た。今回はサンプルとして銅、アルミニウムを測定し、両者とも常温では ϵ_λ として 0.03 程度を得た。

4. 結論

反射率が低温になるほど上がる、すなわち熱放射率が低下する傾向は、アルミニウムでははっきりとは見られなかったが、銅 (Fig. 1) の場合には見ることができた。

また、銅、アルミニウムの熱放射率には、LCGT の要求値 $\epsilon = 0.07$ に対し 2 以上の安全係数が得られることが判明した。

Ti-6Al-4V 合金 β -anneal 材の極低温高サイクル疲労特性

High-cycle fatigue properties of β -annealed Ti-6Al-4V alloy at cryogenic temperatures

由利 哲美、小野 嘉則、緒形 俊夫(物質・材料研究機構)

Tetsumi Yuri, Yoshinori Ono, Toshio Ogata (NIMS)

E-mail: YURI. Tetumi@nims.go.jp

1. はじめに

我々はこれまでに、軽量・高強度特性が要求される国産宇宙ロケットエンジンのターボポンプに使用しているチタン(Ti)合金¹⁾の高性能化に取り組んでいる。ターボポンプ用材料は、極低温・変動応力下の極限環境下での使用になるため、特に極低温における高サイクル疲労特性評価は重要である。Ti 合金の材料特性は、微視組織や不純物量によって影響を受ける。一般的に、Ti 合金の疲労特性には等軸組織が良いとされるが、破壊靱性に優れる針状組織²⁾の Ti 合金にも極低温において高疲労特性を示す報告が見られる³⁾。そこで本研究では、比較的強度-靱性バランスの良い等軸 α と針状 $\alpha + \beta$ の混合組織(Bi-modal 組織)の Ti-6Al-4V (Ti64)合金の鍛造材⁴⁾と、それに β 焼鈍を施した針状 α 組織材を用い、極低温における高サイクル疲労特性について調べた。

2. 実験方法

供試材は、Ti64 合金鍛造材⁴⁾(鍛造比 2.4、 ϕ 350×200、AMS4928 相当、940°C-120min 保持後水冷、705°C-170min 保持後空冷($\alpha + \beta$ -anneal 材))と、それに 1050°C-60min 保持後炉冷(1050°C→300°C (Cooling rate, 約 3°C/min))、720°C-120min 保持後炉冷の β 焼鈍 (β -anneal 材)とした。引張試験および高サイクル疲労試験を、20 K (ガスヘリウム(GHe)雰囲気)、77 K (液体窒素)および 293 K (室温)にて行った。20 KGHe 中における各試験は、冷凍機を用いて試験片を常時冷却しながら、ヒーターによる温度制御方法により実施した⁵⁾。疲労試験は、正弦波での荷重制御にて行い、応力比 $R=0.01$ とし、また、試験周波数は 20 K では 5~15Hz、77 K および 293 K では 10~15Hz で行った。破断しない場合の試験打ち切り回数は、20 KGHe 中では 10^7 回を、77 K および 293 K では 2×10^7 回とした。光学顕微鏡による組織観察および各試験後 SEM により破面観察も行った。

3. 実験結果

引張試験の結果を Table 1 に示す。各試験温度における β -anneal 材の各々の引張特性は、($\alpha + \beta$)-anneal 材に比較し低下が見られる。Fig.1 に 20 KGHe 中における β -anneal 材と($\alpha + \beta$)-anneal 材の S-N 曲線を示す。実験範囲内において、 β -anneal 材の S-N 曲線は($\alpha + \beta$)-anneal 材に比べ緩やかな勾配を示す。 10^7 回における疲労強度(10^7 回未満で破断した最も低い試験応力と、 10^7 回における未破断の試験応力の平均値)は、 β -anneal 材は約 313MPa であり、($\alpha + \beta$)-anneal 材の約 231MPa よりかなり高い値を示した。77 K および 293 K においても β -anneal 材の 2×10^7 回疲労強度は、($\alpha + \beta$)-anneal 材より高い値を示した。すなわち、各試験温度における β -anneal 材の引張強度は($\alpha + \beta$)-anneal 材より低いが、長寿命側の疲労強度は β -anneal 材の方が高い値を示した。20 KGHe 中試験後の SEM による疲労破面観察結果では、両者に 2 点ずつ内部破壊が観察された。($\alpha + \beta$)-anneal 材の疲労破壊起点部にはフェレットが観察され、その大きさはほぼ等軸 α 粒径の大きさに対応している。一方、 β -anneal 材の 20 KGHe 中での疲労試験後の破壊起点部破面を Fig.2 に示す。疲労破壊起点部には、($\alpha + \beta$)-anneal 材同様フェレットが観察され、その様相から粒界 α 相に対応していると考えられる。

参考文献

- (1) NIMS SPACE USE MATERIALS STRENGTH DATA SHEET No.1: National Institute for Materials Science, Japan (2003)
- (2) K.Nagai, et al. : Trans. JIM, Vol.26, No.86(1985) p.405
- (3) 2002 Annual Summary Report on Results, NEDO-WE-NET-0210 (2003) p.321
- (4) T.YURI, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.81(2009) p.227
- (5) T.YURI, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.80(2009) p.75

Table 1 Tensile properties of the β and ($\alpha + \beta$)-annealed Ti-6Al-4V alloy at 20 K (in gaseous helium), 77 K and 293 K.

Materials	Temp.	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_B (MPa)	ϵ (%)	ϕ (%)
β -annealed	20 K	1477	1641	6	7
	77 K	1367	1464	7	8
	293 K	843	914	14	23
($\alpha + \beta$)-annealed	20 K	1599	1703	8	18
	77 K	1405	1511	14	25
	293 K	893	959	19	30

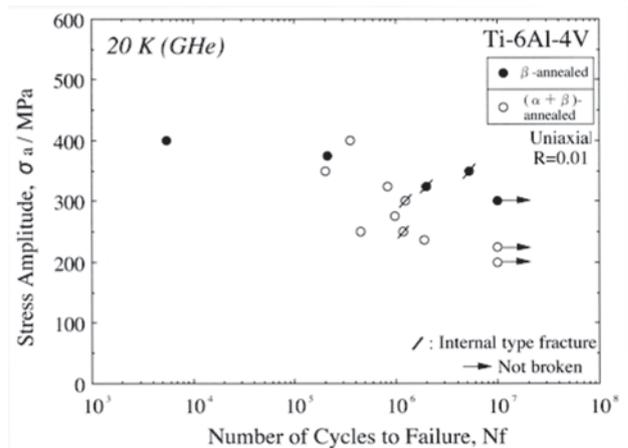


Fig.1 S-N curves of the β and ($\alpha + \beta$)-annealed Ti-6Al-4V alloy in gaseous helium at 20 K.

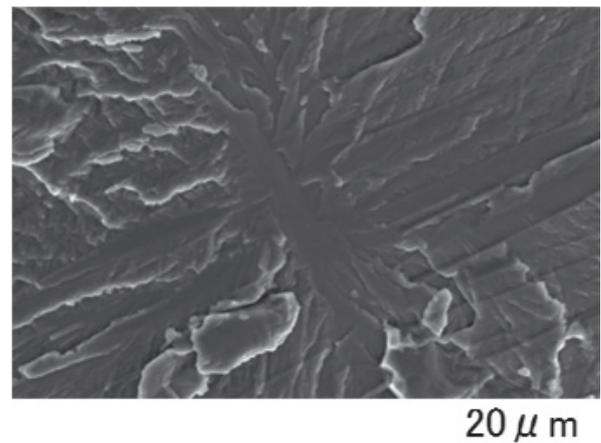


Fig.2 SEM image of internal fatigue crack initiation site of the β -annealed Ti-6Al-4V specimen fatigue-tested in gaseous helium at 20 K ($\sigma_a=350$ MPa, $N_f=5,248,571$).