

ピレンガスによる炭素添加と Cold high pressure densification による MgB₂ 線材の輸送臨界電流特性の改善

Transport critical current density improvement of MgB₂ wires by carbon doping due to pyrene gas and cold high pressure densification

前田 穂, 高野 良紀(日大); Jung Ho Kim, Md. Shahriar Al Hossain, Shi Xue Dou (Wollongong 大)

MAEDA Minoru, TAKANO Yoshiki (Nihon Univ.); KIM Jung Ho, HOSSAIN Md. Shahriar Al, DOU Shi Xue (Univ. Wollongong)

E-mail: maeda@phys.cst.nihon-u.ac.jp

1. はじめに

軽元素からなる MgB₂ は、産業応用している超伝導体 NbTi と Nb₃Sn に比べて 20 K 以上高い超伝導転移温度(T_c)を有する。このため、15~25 K の冷却温度で運転可能な次世代の小型で軽量の磁気共鳴画像(MRI)装置の応用などに期待が持たれている。現在、MgB₂ 線材を実用化するためには、主に作製コストの改善、効率的な炭素添加方法、そして空隙の制御・排除の 3 つの課題が挙げられている。まず、高い臨界電流特性を有する MgB₂ 線材を作製するために、現状では高価な非晶質の硼素粉末が必要不可欠であり、製造コスト低減への 1 つの課題となっている。次に 2 つ目の課題である炭素添加は、MgB₂ の高磁場下の臨界電流特性を改善させるが、従来の添加方法では、炭素を MgB₂ 線材コアの内部へ均質に分散させることが困難であり、MgB₂ 結晶粒間に未反応な炭素の集塊が形成される。この集塊は超伝導電流の輸送を妨げ、その結果、自己磁場及び低磁場下の臨界電流特性を低下させる。3 つ目の課題である空隙は、Mg と B の化学反応によって、MgB₂ 線材のコア内に多数形成される。この空隙形成により、MgB₂ の密度は理論密度の 40-50%程度となり、超伝導電流の輸送が制限される。本研究では、硼素粉末として高価な非晶質粉末だけでなく安価な結晶質粉末の両方を用いた。また、炭素添加剤として芳香族の炭化水素であるピレン(C₁₆H₁₀)を選択した[1]。さらに線材コアの高密度化を図るため、Cold high pressure densification 装置を導入して MgB₂ 線材を作製し、その構造及び輸送臨界電流特性を含めた超伝導特性を評価した。本稿では、ピレン添加が MgB₂ の結晶構造と不可逆磁場(B_{irr})に及ぼす影響について述べる。

2. 実験方法

MgB₂ 線材は 硼素粉末とピレン粉末の他にマグネシウム粉末を原材料として、*In situ* 法から作製した。炭素添加剤のピレン(C₁₆H₁₀)は、硼素やマグネシウムよりも十分低い融点及び沸点を有する化合物である。炭素添加方法としては、線材の作製工程において、ピレン粉末を含めた原材料粉末の混合、または、ピレン粉末をガス化させて硼素粉末に均一分散の 2 種類の方法を用いた。MgB₂ 線材の焼結は、600~800 °C で 0.5~16 時間の条件で行った。結晶構造は線材コアの粉末 X 線回折(XRD)測定から得られたデータのリートベルト解析により評価した。磁場下の臨界電流は 4.2~30 K の温度範囲で測定し、輸送臨界電流密度(J_c)をコア面積で算出した。 B_{irr} は J_c が 100 A/cm²となる磁場で定義した。

3. 結果と考察

作製した線材の格子定数を表 1 に示す。ピレンを添加して 600 °C と 800 °C の温度で焼結した線材の MgB₂ の格子定数 a は、それぞれ、3.0725 Å と 3.0707 Å となる。無添加の MgB₂ の格子定数 a がおよそ 3.0830-3.0860 Å 程度であるため、ピレン添加は 600~800 °C の範囲のどの焼結温度でも格子定数 a を減少させることがわかる。一方、800 °C の温度で焼結した線材の MgB₂ の格子定数 c は 3.5206 Å となり、無添加の MgB₂ の格子定数 c (3.5210 Å 程度)とほぼ変わらない。しかし

ながら、600 °C の温度で焼結した線材の MgB₂ の格子定数 c は 3.5231 Å となり、無添加の MgB₂ に比べてわずかに増大していることがわかる。この a 軸長の収縮だけでなく c 軸長のわずかな伸長は、結晶構造の秩序に大きな低下をもたらす。これは、XRD ピークの半値幅の広がり依存する係数 X と Y のうち、格子歪みに起因する係数 Y の値からも示唆される(表 1)。具体的に、表 1 に示す通り、600 °C の温度で焼結した線材の Y 値は、誤差の値が比較的大きいことを考慮すべきであるが、800 °C の温度で焼結した線材に比べて 2 倍以上大きいことがわかる。この格子歪みの増大により格子欠陥が導入され、電子散乱が増加し、電子の平均自由行程とコヒーレンス長が短縮するので、上部臨界磁場(B_{c2})が改善し、結果として、図 1 に示す通り、超伝導応用の重要な指標の 1 つである B_{irr} の増大につながる。したがって、MgB₂ 線材へのピレン添加は、800 °C の高温焼結だけでなく、600 °C の低温焼結でも MgB₂ の結晶構造に十分大きな格子歪みを引き起こし、 B_{irr} を含めた超伝導特性を改善することが可能である。当日は、輸送臨界電流特性の結果も含めてより詳細に報告する。

Table 1 Refinement results on XRD patterns for MgB₂ wire with 10 wt% pyrene additive sintered under different sintering conditions [1].

Sintering conditions		600 °C, 4 h	800 °C, 0.5 h
Lattice parameters	a (Å)	3.0725 (5)	3.0707 (4)
	c (Å)	3.5231 (5)	3.5206 (3)
Peak broadening coefficients	X	0.21 (1)	0.18 (2)
	Y	0.52 (23)	0.20 (16)

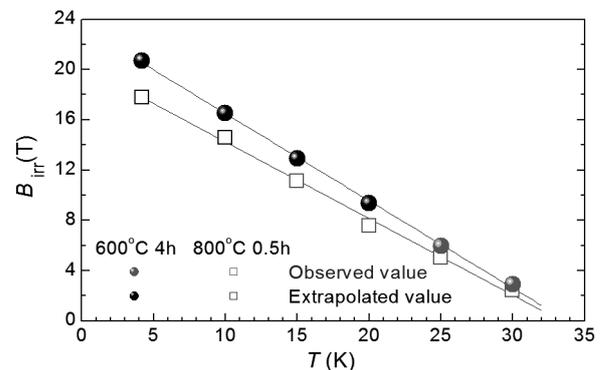


Fig.1 Temperature dependence of B_{irr} for MgB₂ wire with 10 wt% pyrene additive sintered at 600 °C for 4 h and 800 °C for 30 min [1].

参考文献 [1] M. Maeda *et al.*: *Applied Physics Express* (2012) 5 013101

謝辞

本研究はJSPS科研費 24760259, 23860050 の助成を受けて実施したものである。

ex-situ 法 MgB₂ バルクにおける自己焼結の促進 Promotion of self-sintering in ex-situ MgB₂ bulks

水谷 俊介 (東大院工); 山本 明保 (東大院工・JST さきがけ); 下山 淳一, 荻野 拓, 岸尾 光二 (東大院工); 山田 豊 (東海大)

MIZUTANI Shunsuke (The University of Tokyo); YAMAMOTO Akiyasu (The University of Tokyo, JST-PRESTO); SHIMOYAMA Jun-ichi, OGINO Hiraku, KISHIO Kohji (The University of Tokyo); YAMADA Yutaka (Tokai University)
E-mail: 6122075513@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

MgB₂は金属系超伝導体の中で最高の T_c (~40 K)を持ち、液体ヘリウムフリーの冷凍機冷却による 15-30 K での応用が期待されている。MgB₂ 多結晶材料の一般的な作製方法である ex-situ 法は、高密度で均一な組織を比較的容易に得られるが、粒間結合が弱く有効な電流パスの割合であるコネクティビティが低いという問題があった。そのため、さらなる高 J_c 化に向けては粒間結合の強化によるコネクティビティの向上が不可欠である。

我々は ex-situ 法において高温長時間の熱処理により MgB₂ の自己焼結が生じ、粒間結合性が著しく改善することを報告してきた[1,2]。しかし、MgB₂ は融点が 2000°C 以上と高い一方で、焼結に適した高温においては Mg の平衡蒸気圧が高く、Mg の飛散に伴い MgB₄ に分解するため、MgB₂ のコネクティビティは高くならない。また長時間の焼結は粒成長やシーズ材との反応を起こし、超伝導特性を劣化させる。したがって本研究では、900°C での自己焼結反応を促進することを目的とし、元素置換、ボールミルなどの処理を施した自製の高純度 MgB₂ 原料粉末を用いて常圧下で不純物の極めて少ない ex-situ 法 MgB₂ バルクの合成を試みた。得られた試料について微細組織観察、コネクティビティと超伝導特性の評価を行い、加圧焼結試料と比較した。

2. 実験方法

自製 MgB₂ 原料粉末は、酸素濃度 0.1 ppm 以下の不活性雰囲気グローブボックス中で、Mg 粉末と B 粉末の混合粉末を SUS316 管に充填し、一軸プレスによって両端を封じ、Ar 気流中で 900°C, 2 h の熱処理を行うことにより得た。また元素置換を行うため B₄C を Mg:B:C = 1:1.98:0.02 となるように混合した粉末を同様のプロセスで熱処理し、炭素置換 MgB₂ 原料粉末を作製した。

作製した MgB₂ 原料粉末をグローブボックス中で乳鉢あるいはボールミルによって粉砕し、SUS316 管に充填した後、一軸プレスによって両端を封じ、テープ状に成型した。これらの試料について常圧下焼結を 900°C, 24 h の条件で、一軸加圧下焼結を 100 MPa, 900°C, 6 h の条件で行い、ex-situ 法 MgB₂ バルクを得た。得られた試料に対し、粉末 X 線回折(XRD)により構成相を、SQUID 磁束計を用いた磁化率測定により超伝導特性を、交流四端子法による抵抗率測定からコネクティビティを評価し、FE-SEM により微細組織観察を行った。

3. 結果と考察

得られた ex-situ 法 MgB₂ バルクの断面研磨面の反射電子像を Fig. 1 に示す。原料粉末を乳鉢で粉砕して作製した試料 (Fig.1(a), (b))と比較して、ボールミル試料 (Fig.1(c))の組織は MgB₂ 粒同士が強く結合しており、電流パスとして期待できるネットワーク状の組織が観察された。一軸加圧下焼結をした試料では空隙がほとんど見られず、非常に緻密な組織が見られた。

試料の電気抵抗率の温度依存性と、コネクティビティを Fig. 2 に示す。従来試料と比較して自製 MgB₂ 粉末、炭素置換粉末を使用した試料では電気抵抗率が大きく低下し、高いコネクティビティを示した[3]。またボールミル試料では電気抵抗率

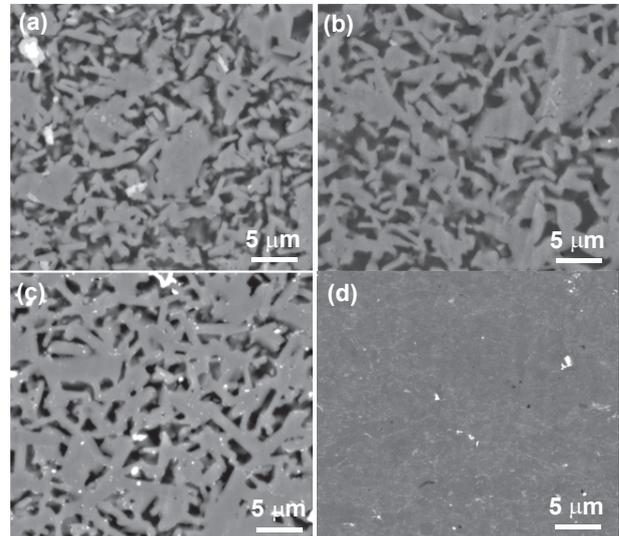


Fig. 1 Secondary electron images of ex-situ MgB₂ bulks sintered at 900°C. (a,b,c) Sintered under ambient pressure from high purity MgB₂ powder (a), carbon substituted MgB₂ powder (b), and ball-milled MgB₂ powder (c). (d) Hot-pressed.

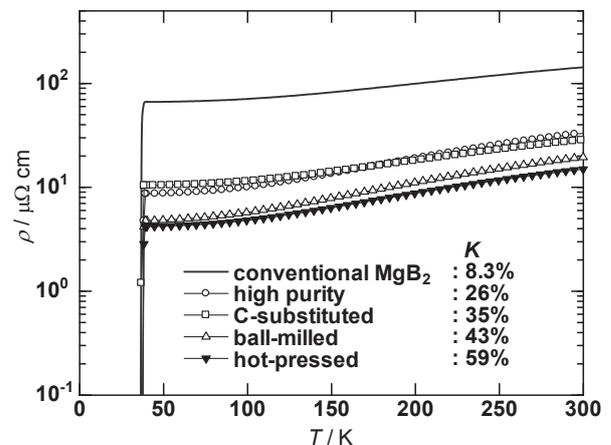


Fig. 2 Temperature dependence of electrical resistivity for ex-situ MgB₂ bulks.

はさらに低下し、焼結が促進され粒間結合が強化されたことが示唆された。この試料のコネクティビティは常圧下で作製した ex-situ 法 MgB₂ 多結晶体として最高の 43%に達し、一軸加圧下焼結を行った試料の値(59%)に近づいた。以上の結果から、高純度界面を持つ原料粉末の使用、ボールミル粉砕による結晶粒径の微細均一化が MgB₂ の自己焼結の促進に有効であり、高密度かつ強固に結合した焼結粒界が記録的に高いコネクティビティに寄与したことが示された。

参考文献

1. A. Yamamoto *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, 010105 (2012).
2. H. Tanaka *et al.*: *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 115022 (2012).
3. S. Mizutani *et al.*: Abstracts of CSJ conference, Vol. **87** (2013) p.96; submitted to *Supercond. Sci. Technol.* (2013).

In-situ PIT 法で作製した MgB₂ 線材における Mg 粉末粒径の組織と臨界電流に及ぼす影響

Effect of Mg powder size on the microstructure and current density of
In-situ PIT-processed MgB₂ wires

新田 隆二, 松本 明善, 葉 術軍, 熊倉 浩明 (NIMS)

NITTA Ryuji, MATSUMOTO Akiyoshi, YE Shujun, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: KUMAKURA.Hiroaki@nims.go.jp

1. はじめに

MgB₂の線材化法としては、原料混合粉末を金属管に充填して線材加工後に熱処理をする PIT 法が一般的である。一方で、Mg 棒のまわりに B 粉末を配置する Mg 内部拡散 (IMD)法もあり、MgB₂層の密度が上昇して PIT 法よりも高い J_c や J_{c0} が得られるという特徴がある。PIT 法では通常微細な Mg 粉末を用いるが、Mg 粉末の粒径を大きく (粒の数を少なく) していくと、Mg 粒子の周囲が B 粉末で覆われる形になり、Mg 拡散法と類似の状況が出現する。そして Mg 粒径をさらに大きく (数を少なく) して行き、最終的に Mg が一個 (一本) になった極限が Mg 内部拡散法であると考えられる。したがって PIT 法において Mg 粒径が大きくなるに従って J_c が上昇することが期待される。

本研究では、PIT 法において Mg 粉末の粒径を変化させて線材を作製し、組織と J_c 特性との関係を調べて J_c を高くする組織について考察した。

2. 実験

Mg の粉末粒径として ~45μm、~150μm、212~600μm の三種類を選択した。これらの Mg 粉末とアモルファスのナノ B 粉末とを混合し、外径 6.2mm、内径 3.5mm、長さ 48mm の鉄管に充填して径 0.6~1mm の単芯線材に加工した。また単芯線材を 7 本束ねてさらに鉄管に挿入し、線材に加工して 7 芯線材を作製した。これらの線材を 600~750°C で 1 時間、真空中にて熱処理をした。線材の組織を光学顕微鏡、走査電顕ならびに X 線回折で調べた。また臨界電流 I_c を四端子抵抗法により、4.2K にて 12T までの磁界中で測定した。I_c はそれぞれの条件で作製した線材 3 本について測定した。I_c は 1μV/cm のクライテリオンで定義し、J_c は I_c を MgB₂ コアの断面積で除して求めた。

3. 実験結果と考察

Fig. 1 に、650°C で熱処理をした場合の 4.2K での J_c-H 特性を示す。J_c データにはバラツキが認められるが、Mg の粒径が増大するに従って J_c が増大する傾向のあることが判る。J_c の磁界依存性は Mg の粒径によってほとんど変化しない。

Fig. 2 には、4.2K、10T における J_c の熱処理温度依存性を示す。いずれの熱処理温度においても Mg 粒径が増大するに従って J_c が上昇する。また、いずれの Mg 粒径においても熱処理温度が高くなるに従い、J_c はやや低下する傾向にあることが判る。

Fig. 3 に光学顕微鏡による熱処理前の 1mm 径の単芯線材の、線材長手方向の断面組織を示す。いずれの場合も Mg 粉末は線材長手方向に加工されてフィラメント状になっているが、212~600μm の粒径では太い Mg フィラメントが見られその周囲には B 粉末が存在している様子が判る。この場合、熱処理によって Mg が周囲の B 相中に拡散して行き、反応が起こって MgB₂ が生成されると考えられるが、そこで得られる MgB₂ 層は充填率が高く、高い J_c が得られると考えられる。

一方で、細い線材や 7 芯線材の場合は、J_c はむしろ Mg 粒径が増大するに従って低下し、またバラツキが大きくなる傾向

を示した。これは各フィラメント径が Mg フィラメント径に近くなり、周囲の B 量が必要量に満たなくなる、等の理由が考えられる。

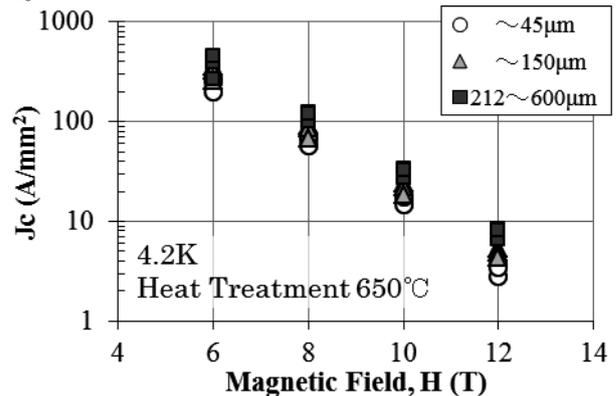


Fig. 1 Mg powder size dependence of J_c-H curves (1 mm φ)

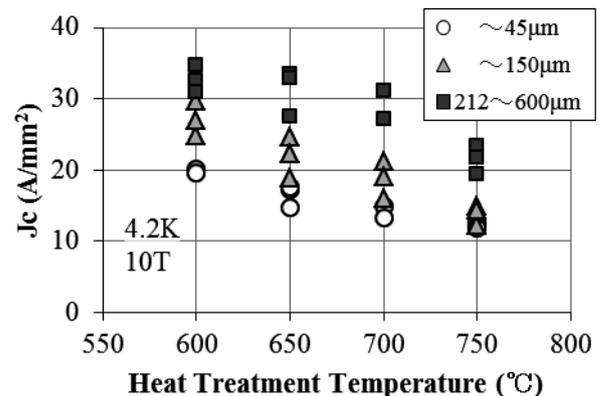


Fig. 2 Heat treatment temperature dependence of J_c(10T)

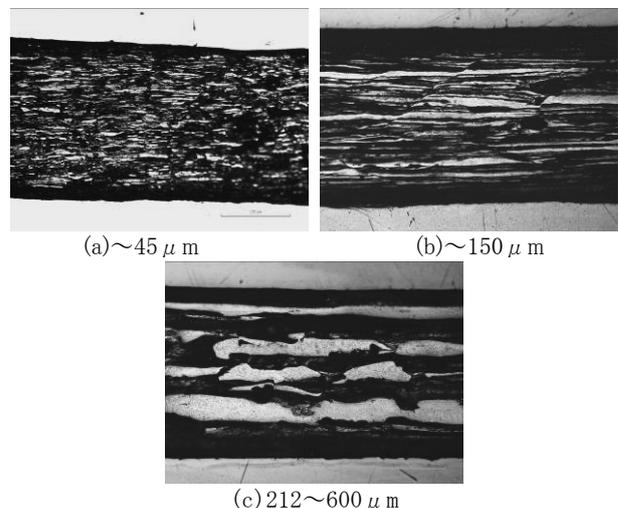


Fig. 3 Optical microscope images of longitudinal cross sections of wires with different Mg powder size(1mm φ)

IMD 法と PIT 法をミックスした方法による高臨界電流密度 MgB₂ 線材の作製

Fabrication of high performance MgB₂ wires with a new method combined of IMD and PIT processes

葉 術重, 松本 明善, 戸叶 一正, 大村 孝仁, 熊倉 浩明 (NIMS)

YE Shujun, MATSUMOTO Akiyoshi, TOGANO Kazumasa, OHMURA Takahito, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

E-mail: YE. Shujun@nims.go.jp

1. はじめに

最近では、内部 Mg 拡散法(IMD 法)により高い臨界電流が得られるようになり[1,2]、長い線材の作製も可能になってきた。しかしながら、IMD 法では、Mg の拡散距離が長いので、未反応の B 粒子[3]や B リッチ相[4]が出てくるので、線材断面における MgB₂ の面積の比率が減少する。即ち MgB₂ 占有率が小さくなってしまふ。これは Engineering J_c (J_e) の観点から不利である。更に、IMD 法による MgB₂ 線材の中心には空隙が形成されるので、この空隙を減少させることが望まれる。本研究では、IMD と PIT 法を混合した新しい方法で MgB₂ 線材を作製した。この方法は IMD 法線材における Mg 棒の径を減少させ、同時に B 粉末層に Mg 粉末を添加するものである。

2. 実験

(1)IMD法による MgB₂ 線材の作製: 内径 3.5mm, 外径 6mm の Fe チューブに、径 2mm の Mg 棒を真中において、周りは 10%SiC を添加した B 粉末を充填した。充填後、ミゾロールと線引きにより 1.16mm 径の線材に加工した。

(2)PIT 法による MgB₂ 線材の作製: 内径 3.5mm, 外径 6mm の Fe チューブに、10%SiC を添加した Mg と B の混合粉末を充填して、上記と同じ方法で径 1.0mm の線材を作製した。

(3)IMDと PIT をミックスした新方法による MgB₂ 線材の作製: Fe チューブの外径を 6mm とし、内径は三種の線材に対応して、3.5、4、および 4mm とした。これに対応して Mg 棒の径はそれぞれ 2、1.7、及び 1.4mm とした。充填粉末は B 粉末と上記それぞれに対して 6%、17%、ならびに 25% の Mg 粉末、これに更に 10% の SiC を添加して得た。(1)、(2)と同じ方法で径 1.16、1.2、と 1.26mm の線材を作製した。それぞれの線材を M1、M2、と M3 と命名した。

B 粉末は粒径 325mesh、純度 99% であり、Mg 粉末は粒径 325mesh、純度 99.8%、SiC の粒径は 20nm である。上記の線材径は線を作製する時の状況によって変化させたが、特に実験結果に影響はないと考える。

上記線材の臨界電流密度と微細組織を評価して、両者の関係の検討を行った。

3. 実験結果及び考察

図1の(a)、(b)、と(c)は IMD、PIT、ならびに IMD と PIT をミックスした新方法による線材の熱処理前の模式図である。この図で、灰色はシース、白色は Mg (大きいものは棒、小さいものは粉末を表す)、黒色は B 或いは B に添加物(SiC)を添加した領域を示す。IMD と PIT をミックスした方法では、Mg 棒の径を小さくすることができ、熱処理後の空隙も減少させることができた。

図 2 はこの IMD 法と PIT 法をミックスした方法で作製した線材の長手方向の断面 SEM 像である。MgB₂ 層厚は 180μm と IMD 法に比べてかなり厚いが、未反応 B 粒子や B リッチ相はほとんど認められなかった。代わりに、Mg 粉末添加により線材加工方向に長く伸びた Mg に対応した空隙が認められた。しかしながら、それでも、通常の PIT 法による MgB₂ の密度よりかなり高い充填密度が得られた。未反応 B 粒子と B リッチ相の減少は J_c が上がるが、空隙は J_e を下がる。

図 3 には本実験で作製した線材の 10T、4.2K における J_c と J_e を示す。ここで、M1 において最大の J_c を示し 4.9 x 10⁴ A/cm² が得られた。これは未反応 B の減少と空隙の増大のバランスで決定される[3]。最大の J_e は M2 において得られ、その値は 5.8 x 10³ A/cm² であった。M1 よりも Mg 添加量の多いところで J_e は最大となるが、これは Mg 添加量を増やすことで MgB₂ 層厚を増加させることが可能で MgB₂ の占有率を上げることが出来るからである。

この方法では MgB₂ 層厚が大きくても Mg の拡散距離を減少させることが可能で、未反応の B 粒子と線材中心の空隙を減少させることが出来る。MgB₂ 層の比率の増大に有効である。更に、B リッチ相の減少も可能である。この IMD 法と PIT 法を混合した新しい方法は、高性能 MgB₂ 線材を作製する観点から、有力な方法と考えられる。

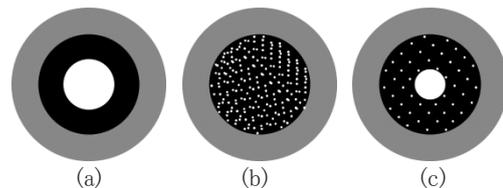


Fig.1 IMD(a)、PIT(b)、ならびにIMDと PIT をミックスした新方法(c)による線材断面の熱処理前の模式図

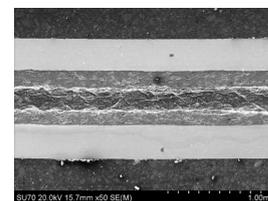


Fig.2 IMD と PIT をミックスした方法により作製した MgB₂ 線材の長手方向の SEM 像

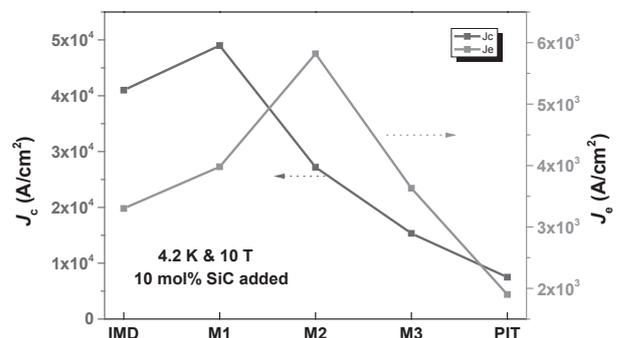


Fig.3 10T、4.2K における J_c と J_e の比較

参考文献

1. Li et al, *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 115023
2. Ye et al, *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013) 125003
3. Ye et al, *Supercond. Sci. Technol.* 25 (2012) 125014
4. Li et al, *Supercond. Sci. Technol.* 26 (2013) 095007

謝辞: 本研究は JST 先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の助成を受けた。

内部 Mg 拡散法によって作製された鉄シース MgB₂ 線材における 局所臨界電流特性と組織構造との対応

Direct Relationship between Local Critical Current Properties and Microstructures in Iron-sheathed MgB₂ Wires Fabricated by IMD Process

山本 篤史, 東川 甲平, 木須 隆暢(九州大学); 葉 術軍, 松本 明善, 熊倉 浩明(物質・材料研究機構)

YAMAMOTO Atsushi, HIGASHIKAWA Kohei, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

YE Shujun, MATSUMOTO Akiyoshi, KUMAKURA Hiroaki (NIMS)

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

1. はじめに

超伝導線材の開発においては、四端子法によって得られる J_c 値など線材性能と、電子顕微鏡によって観察される組織構造との関係を明かとし、線材作製プロセスへフィードバックしていくことが望まれる。一方、両者間では評価可能な空間スケールが桁桁も異なるため、直接の対応関係を明らかにすることは困難となっていた。そこで本研究では、内部 Mg 拡散法によって作製された鉄シース MgB₂ 線材を対象に、磁気顕微鏡法によって局所臨界電流分布を評価し、観測すべき位置を高精度に特定した上で組織観察を行うことで、本線材の性能決定因子の解明に取り組んだ。前回は SiC の添加に由来する Mg₂Si の析出が局所的に特性を低下させる様子を報告したが [1]、今回は SiC に代わる C ドープ法として C coating したナノサイズの B 粉末を使用した線材に対して同様の評価を行い、電流制限因子について比較・検討した。

2. 磁気顕微鏡による局所臨界電流分布評価

測定試料は、単芯の鉄シース MgB₂ 線材であり、Fig. 1 (a), (b) のように研磨によって断面出しを行ったものである。10 K において走査型ホール素子磁気顕微鏡 (SHPM) によって得られた残留磁界分布を Fig. 1 (c) に示す。残留磁界の強度は MgB₂ 層に流れる磁化電流によるものであり、この電流密度は臨界電流密度 (J_c) に対応する。そこで、鉄シースの磁性を考慮した有限要素法により、この磁界強度と J_c の関係を求め、Fig. 1 (d) に示すような J_c の長手方向分布を導出した。同図には、同様の手法で得た前回の SiC 添加線材の局所 J_c 分布も破線で示しているが、今回の試料では、ばらつきが見られるものの、前回の試料に対して明らかに高 J_c 部が存在している。

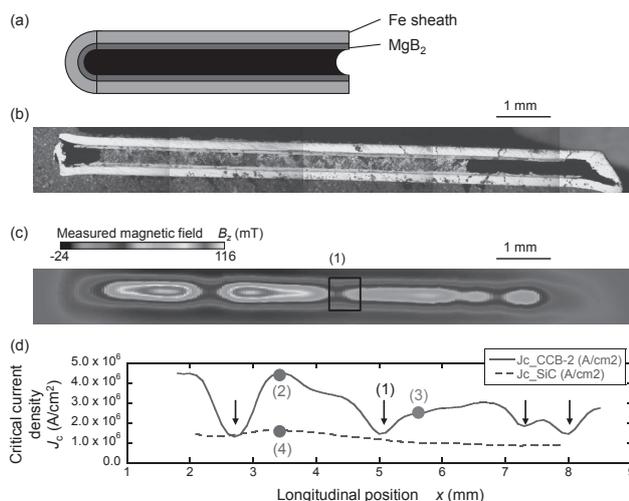


Fig. 1 (a) Schematic diagram, (b) optical micrograph, (c) remanent magnetic field distribution at 10 K, and (d) estimated J_c as a function of longitudinal position of the sample characterized by scanning Hall-probe microscopy. (1) to (4) are the positions described in detail in Figs. 2 and 3.

3. 局所臨界電流分布と組織構造との対応

これらの要因を調べるべく、SHPMによって高精度に位置を特定したうえで、該当部の電子顕微鏡観察を行った。まず、局所特性低下部の高解像磁気像と光学顕微像の比較を Fig. 2 に示す。矢印で示す磁界強度の低下部に丁度クラックが存在していることがわかる。すなわち、今回の試料の局所特性低下の要因は、前回の試料のような SiC 由来の凝集物などではなく、試料のハンドリングに依ることを示唆しており、作製プロセスに起因する本質的な問題は解決されていると考えられる。また、前回の試料の最高特性部と今回の試料の SEM 像の比較を Fig. 3 に示す。今回の試料では、前回の試料に見られた未反応の B が無くなっており、これによってマトリックスの J_c 自体も向上していることがわかる。さらに、今回の試料には未だ J_c のばらつきが見られるが、組成分析の結果、高 J_c 部では B の濃度が低く、低 J_c 部では B の濃度が高いことから、 J_c の高低は B の割合に影響を受けているという事がわかった。この高 J_c 部は、通電試験で得られている J_c 値の 2 倍程度であり、B の濃度の最適均一化によりさらに高特性となるポテンシャルを示すものである。以上のように、このハイブリッド顕微鏡法によって、局所超伝導特性と組織構造との関係を明かとし、線材開発へのフィードバックに直接的に貢献する貴重な情報を得ることができた。

謝辞 本研究は、JST 先端的低炭素化技術開発 (ALCA) 「未来の水素利用社会を支える低コスト高性能 MgB₂ 線材の開発」の一環として行ったものである。

参考文献

1. K. Higashikawa, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87, p. 98

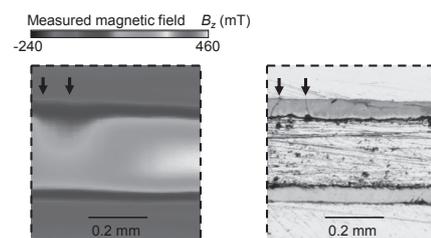


Fig. 2 Comparison between high resolution remanent magnetic field image at 10 K and optical micrograph for the position (1) in Fig. 1.

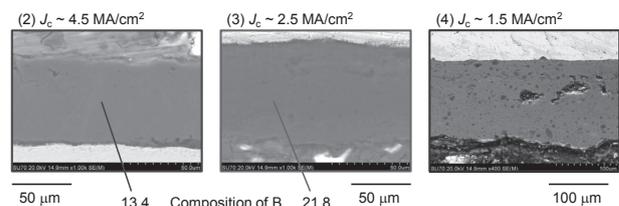


Fig. 3 SEM images for positions (2), (3) and (4) in Fig. 1 (d) with different values of local J_c .

MgB₂ 素線の液体窒素温度中における応力-歪み特性及びポアソン比測定 Measurement of Stress-Strain Properties and Poisson's Ratio of MgB₂ Strand in LN₂

浅見 拓也, 太田 成美, 葛 雅志, 高尾 智明(上智大学); 新富 孝和(日本大学); 榎田 康博(KEK);
濱島 高太郎, 花田 一磨(八戸工業大学); 津田 理, 宮城 大輔(東北大学); 岩城 勝也(岩谷産業)

ASAMI Takuya, OTA Narumi, KATSURA Masashi, TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); SHINTOMI Takakazu (Nihon Univ.);

MAKIDA Yasuhiro (KEK); HAMAJIMA Takataro, HANADA Kazuma (Hachinohe Inst. Tech.);

TSUDA Makoto, MIYAGI Daisuke (Tohoku Univ.); IWAKI Katsuya (Iwatani Corp.)

E-mail: takuya88.12.13@gmail.com

1. はじめに

MgB₂は低コストかつ高い臨界温度(39 K)を持ち、今後の更なる発展が期待される。しかし、現在 MgB₂の歪みに対するデータが極めて少ないため、機械特性の把握が重要となる。

そこで、本研究では外部磁場を印加し、MgB₂素線の I_c -歪み依存特性を測定する試験を考案した。この試験では、MgB₂素線をスプリング状にしたサンプルを使用し、そのスプリングを伸長することで歪みを掛ける。ただし、この時の歪みは、コイルばねの定義式から求めるせん断歪みである為、MgB₂素線ポアソン比を使い縦歪みに変換する必要がある。しかし、MgB₂素線の応力-歪み特性やポアソン比は現在全く分かっていない為、 I_c -歪み依存特性試験のために引張試験を行い材料特性の把握を行った。

今回は、室温と液体窒素温度中にてそれぞれ引張試験を行い、MgB₂素線の応力-歪み特性及びポアソン比を測定したので報告する。

2. 実験方法

本試験では、MgB₂素線(Hyper Tech Research Inc.製)を試験サンプルに使用し、常温中と液体窒素温度中でそれぞれ引張試験を行った。

引張試験では、精密万能試験機(島津製作所製)を使用しサンプルに荷重を付加した。また、サンプルには、2軸のマイクロ歪みゲージ(共和電業製、ゲージ長0.2mm)を2枚対になるよう接着し、歪み測定時に曲げ歪みの影響が加わらないようにしている[1]。Fig. 1に、ゲージを取付けたサンプルを示す。

3. 実験結果・考察

常温中と液体窒素温度中でそれぞれ引張試験を行い、測定した応力-歪み特性を Fig. 2 に示す。また、低温中での縦歪み-横歪み特性を Fig. 3 に示す。

Fig. 2より、常温中と低温中で特性が異なることが分かる。これは、MgB₂素線を構成する金属の熱収縮が影響していると考えられる。また、ポアソン比を求めると、常温中では0.366、低温中では0.376となった。値は若干異なるが誤差の範囲内であり、ポアソン比は常温中と低温中で同一だと考えられる。

4. まとめ

2軸のマイクロ歪みゲージを2枚サンプルに接着することで測定誤差を最少にし、常温中と低温中での MgB₂素線のポアソン比を求める事が出来た。

現在は、MgB₂素線の機械特性に関する試験の準備を進めており、外部磁場下での I_c -歪み特性の評価を行う。なお、この試験では歪みの掛け方を工夫したので、今回測定したポアソン比が必要となる。

5. 謝辞

本研究は、JST先端的低炭素化技術開発事業(ALCA)の助成を受け、実施したものである。

実験においては、高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センターの方々にご指導、ご協力を頂いた。

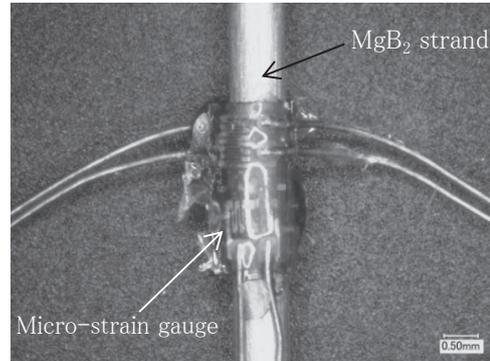


Fig. 1. Sample of MgB₂ strand with micro-strain gauges

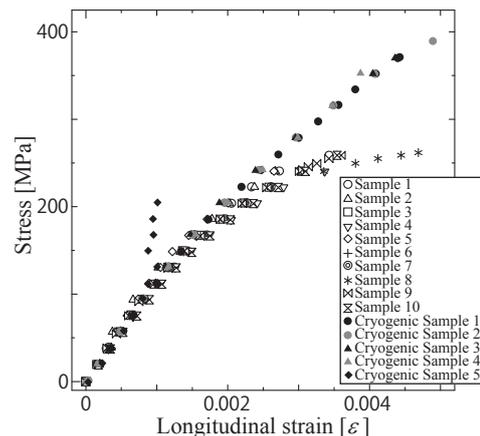


Fig. 2. Measured stress-strain curves at room temperature and liquid nitrogen temperature

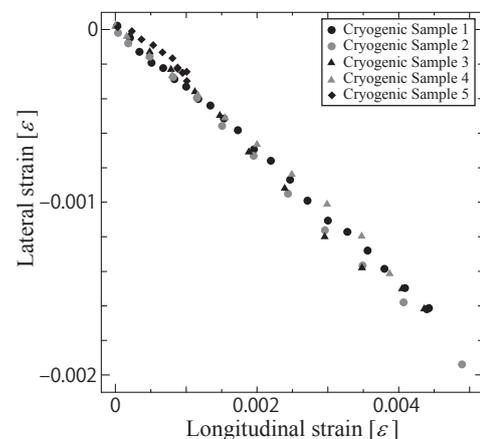


Fig. 3. Relation between longitudinal strain and lateral strain at liquid nitrogen temperature

参考文献

1. X. Jin, et al.: Tensile strain dependence of critical current of RHQ-Nb₃Al wires, Cryogenics 52 (2012) 805-809

石狩市でのデータセンターへの電力輸送__超電導直流ケーブルプロジェクト

Electric Power Transmission for Internet Data Center in Ishikari, DC Superconducting Power Cable Project

山口 作太郎(中部大学);越塚 博美(千代田化工);林 和彦(住友電工);澤村 徹(さくらインターネット)
 YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); KOSHIDUKA Hiromi (Chiyoda Corp.); HAYASHI Kazuhiko (Sumitomo Electric);
 SAWAMURA Tetsu (Sakura Internet)
 E-mail: yamax@isc.chubu.ac.jp

1. はじめに

平成 24 年度の補正予算で石狩市のデータセンター向けに超電導直流給電を行うための予算 25 億円が経済産業省から千代田化工、住友電工、さくらインターネット及び中部大学のチームに国プロとして委託された。内容は太陽電池を電源とする 500m ケーブルと系統から受電し、直流変換した電力を 2000m に渡って送電するケーブルの 2 本を建設することになっている。平成 26 年度末までに、500m ケーブルは運用を開始し、2000m ケーブルはシステムとして建設を終えることになっている。Fig. 1 に 2000m のケーブルシステムの構成を簡単に示した。但し、2000m ケーブルの電力変換器などは予算的には含まれていない。比較的短い時間で建設を進める必要があり、2000m ケーブルは完成した時点で世界最長の超伝導ケーブルになる。このため、検討・懸案事項を速やかに解決しながら進める必要があり、複数の関係企業が集まり、設計・試験作業を進めている。ここでは設計方針と現状を報告する。

2. 設計の基本方針と課題

銅ケーブルに比べて超伝導ケーブルは、大電力を比較的低電圧で大電流送電できることが大きな特長になる。また、低送電損失の特長を生かすためには、長いケーブルである必要がある。そして、低コストが必要である。このため、ケーブルの電流・電圧は以下の値を選んだ。

5kA, ± 10 kV (100MW)

また、2000m の長さは既存の送電と比較すると短く、将来長くするための課題を想定して設計を進めている。長いケーブルを建設するときの主要な課題として、下記を検討している。

- 1) ケーブル熱収縮の吸収
- 2) 低い循環動力
- 3) システムの低熱侵入

ケーブル熱収縮は 0.3%ほど有り、2000m では 6m 縮む。今後長くなり 200km になると 600m も縮む。そして、この熱収縮は長手方向に渡り均一には縮まない可能性を考えると安全サイドになるため、長いケーブルを建設するには抜本的な熱収縮対策が必要になる。これは常温に戻すときの対応も含まれる。また、超伝導ケーブルは銅ケーブルに比べて小型になるため、ケーブル接続部を少なくすることはケーブル事故を減少させるため、重要な方針の一つとなる。

長いパイプ中に冷媒を循環させるためには吐出圧の高いポンプが必要になる。しかし、これは熱侵入増大の原因でもあるので、ポンプと配管サイズについての最適設計が必要になる部分である。特に、現状の多くのポンプは流量が多く吐出圧が低いことが得意な構造となっているので、今後も注意が必要である。ポンプの吐出圧と流量は断熱 2 重管の熱侵入量が大きく関連する。もし、単位長さ当たりの熱侵入が半分になると、流速は半分で済む。すると、吐出圧は 1/4 で良い。このため、断熱 2 重管の熱侵入量低減は長距離ケーブルの技術的基盤となる。もちろん、これは超電導ケーブルの特長である

低損失の基礎である。また、データセンター内での比較的短距離で大電流への適用を想定すると、電流リードからの熱侵入低減が実用化への大きな課題となる。

以上は中部大学で行ってきた研究課題でもあり、設計は中部大の 200m ケーブル実験を基礎[1, 2]にして進めている。

3. 設置場所と今後の展望

2000m ケーブルの設置場所は石狩市の港湾地区であり、データセンターの他に多くの工場がある。更に、LNG プラント基地が近くにある。また、ここは札幌に近く、このプラント基地から札幌市に天然ガスのパイプラインが伸びている。石狩市は風力発電適地であり、水深 20m 以内の海が広く、大規模な着床式洋上風力発電が計画されている。更に、100 万 kW を超す火力発電所建設が LNG プラントそばに予定されている。このため、石狩市からの支援・助言を受けながら、エネルギー利用の高度化の中に超電導応用を組み込む形で本プロジェクトは進んでいる。

謝辞

経済産業省の研究開発課のみなさまには多くの支援を頂いています。また、設計・試験は千代田化工、住友電工、さくらインターネット、住友電設、ジェック東理社、みずほ情報総研の関係者の多くの方のみなさまにお世話になっています。更に、石狩市及び北海道庁の関係者のみなさま及び新金属協会の織山純氏には広くご支援を頂いています。そして、中部大学の飯吉厚夫理事長を始め超伝導センターのユージ・イワノフ、渡邊 裕文、浜辺 誠、筑本 知子、高野 廣久のみなさまには設計・試作試験を精力的に進めて頂いています。記して感謝を表します。

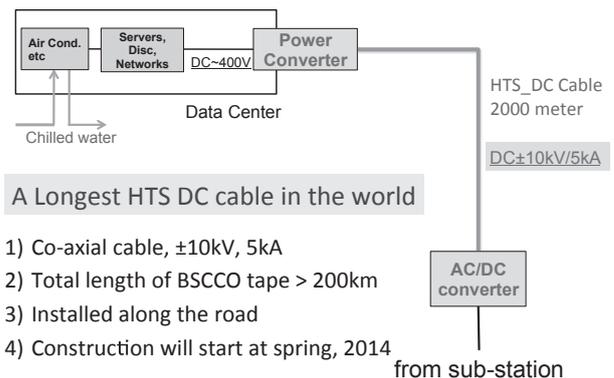


Fig.1 Data Center (iDC) and the 2000-meter Superconducting DC Power cable.

参考文献

1. S. Yamaguchi et al, Prof. ICEC23/ICMC2010, (2010) pp. 1041-1047.
2. S. Yamaguchi et al, FSST News, No. 139 (2013).

サブクール窒素冷却による HTS 超電導ケーブルの過電流通電時における温度及び圧力解析コードの開発

Temperature and Pressure analysis computer code of HTS superconducting cable Cooled by Subcooled LN2 with fault current.

佐藤 勇輔, 我妻 洸, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学)

SATO Yusuke, AGATSUMA Koh, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi(Waseda University)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

超電導ケーブルは電力輸送の高密度化と低損失化という特性を兼ね備えていることから、電力輸送システムの拡充という課題に対する最善の解決策として期待されている。しかしその実用化に向けては短絡事故に対する影響評価が必要不可欠である。66 kV 系統では事故時最大で 31.5 kArms-2 s の過電流が流れることが想定されている。過去に実施された実験により一度事故が発生すると、液体窒素の温度はケーブルから放出される熱により、ケーブルの下流に沿って徐々に増加するということが明らかになった。したがって HTS ケーブルの実用化に向けては、事故後の温度分布を評価することが極めて重要となる。本研究ではケーブルコアから過冷却窒素の強制対流伝熱を考慮し、フォーム部窒素も考慮した HTS ケーブルの温度・圧力分布を計算する解析コードを開発した。

2. 30m モデルケーブルの熱・圧力連成解析

図 1 に示す 3 心 1 括構造の 30m 超電導ケーブル内温度分布を数値計算し、コルゲート管内部を流れる液体窒素の温度・圧力解析を行った。まず図 2 のモデルでの熱解析によりケーブル内部の温度分布から冷媒への入熱量を計算した。次にその入熱量によりフォーム部窒素の状態を求め、フォーム内部からの窒素の噴出による端部の圧力変化を図 3 に示すモデルで解析した。

なお本研究では以下の仮定で解析を行った。

- (A) 銅フォーム/HTS 導体、及び HTS シールド/銅シールドは銅の特性を持った一層とみなし、各層温度は幅方向で一定である。
- (B) 絶縁層の長手方向の熱伝導は無視する。

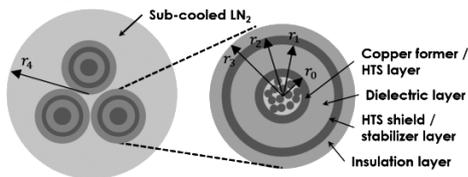


Fig.1 Model Cable Structure (Radial Direction)

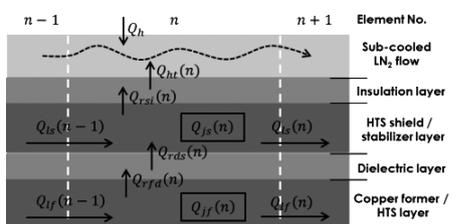


Fig.2 Model Cable Structure (Longitudinal Direction)

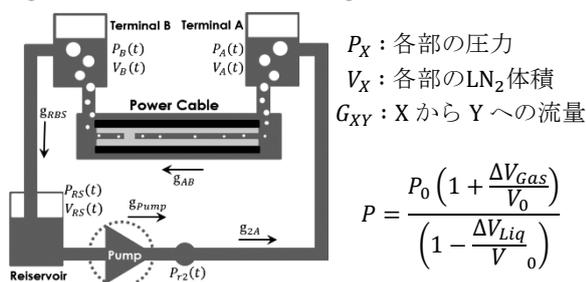


Fig.3 Pump Circulation Model

P_X : 各部の圧力
 V_X : 各部のLN₂体積
 G_{XY} : X から Y への流量

$$P = \frac{P_0 \left(1 + \frac{\Delta V_{Gas}}{V_0}\right)}{\left(1 - \frac{\Delta V_{Liq}}{V_0}\right)}$$

ケーブル内の温度分布は以下の非線形熱伝導方程式を数値的に解くことにより計算し、冷媒の温度は流体の物性値計算プログラム GSPAK を用いて計算した。

$$\rho_{cu} c_{cu} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{cu} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_{in} - Q_{out}$$

Q_{in} : 長手方向の入熱 Q_{out} : 長手方向の放熱

図 4 に解析結果を示す。グラフから Terminal A の初期気体容積を 30L と仮定した際には圧力が過大上昇してしまうが、100L とした場合では過度の圧力上昇は起こらなかった。いずれの結果も実験結果とは乖離しており、噴出ガス量を推定するモデルの再検討も含め対策を講じる必要がある。

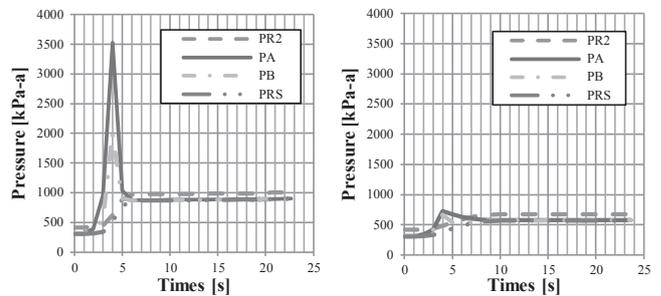


Fig.4 Calculation Result

(Initial Gas Volume at Terminal A = Left:30L Right:100L)

3. 長尺ケーブルの圧力解析

実用化に向けて長尺ケーブルについての検討を行うため、240mのケーブルに対し、冷媒のガス噴出比率をフォーム部の 5%、3%、1%と仮定したときの圧力解析をサーキュレーションポンプモデルによる解析コードにより行った。図 5 から事故時に発生すると推定されるガス量の割合によってはケーブル内部の圧力に大きな変化が生じることがわかる。

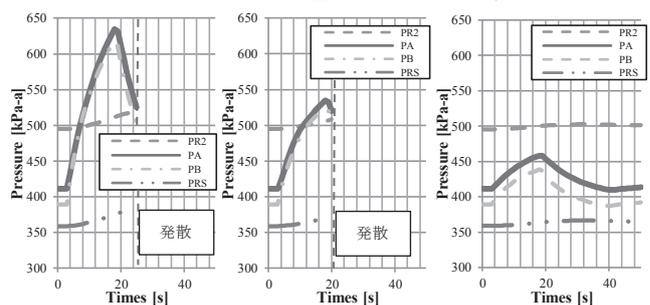


Fig.5 Calculation Result

(Vaporization Ratio = Left:5% Center:3% Right:1%)

4. まとめ

本研究では、ケーブル内の冷媒の温度・圧力分布を求めプログラムを開発した。このプログラムにより圧力の推定を行ったところ、ケーブル内部の圧力は銅フォーム部から噴出するガス量に大きく依存することが分かった。今後は噴出するガスの挙動を正確に推定するために、フォーム内窒素の気化メカニズムなど、冷媒の挙動をより正確に把握する必要がある。

参考文献

1. M.Furuse, S.Fuchino, K.Agatsuma, et al.: IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 21 (2011) p.1021

三相同一軸型高温超電導ケーブルのケーブル構造と送電可能距離

Maximum cable length and cable structure in an HTS tri-axial cable

秋田 真志, 北谷 大貴, 大野 真, 宮城 大輔, 津田 理(東北大); 濱島 高太郎(八戸工大)
 AKITA Masashi, KITAYA Daiki, ONO Shin, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto (Tohoku Univ.);
 HAMAJIMA Takataro (Hachinohe Instituted Technology)
 E-mail: akita@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

超電導ケーブルは既存の銅ケーブルに比べ、大容量で低損失となるため、次世代の送電ケーブルとして期待されている。特に、三相同一軸型ケーブルは、三心一括型ケーブルよりも線材使用量や交流損失を大幅に削減できる上に、大きな冷媒流路を確保できるため、長距離送電に向いている。これまでは、三相同一軸型ケーブルの電流平衡モデルを用いてケーブル内の冷却特性の検討を行い、洋上風力発電用の大容量のケーブルについて、送電可能距離の検討を行ってきた[1]。本研究では「高温超電導実証プロジェクト」[2]で検討されている地中管路敷設用のケーブルを想定し、三相同一軸型のケーブル構造を変化させた場合の定常運転時における送電可能距離を、伝熱特性と流体特性の両面から検討した。

2. 解析手法

本解析に用いた三相同一軸ケーブルの諸元を **Table 1** に示す。主な超電導ケーブルの諸元は、現在実施されている「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」[2]を参考にしている。各相の導体部分は超電導線、故障電流分担のための銅テープ、絶縁のための PPLP®により構成され、コルゲート管に収容されているとした。液体窒素のフロー方法として、**Fig.1** に示す並流(Parallel flow)と、向流(Counter flow)を考えた。並流は液体窒素の復路が無い場合、別流路を復路とする必要があるが、向流はケーブル一本で冷媒を往復させられるため、循環系が並流に比べて小さくなるという利点がある。

ケーブルの送電可能距離については、伝熱特性は、液体窒素の温度が 65K から 77K に上昇する距離、流体特性は、液体窒素圧力が 1.0MPa から 0.2MPa に減少する距離として算出した。液体窒素の流量は 40 liter/min. を上限とした。三相同一軸型は流路を 2 つ持つため、導体部の構成やケーブル外径によって各流路の断面積が変化する。そこで、今回は管路径を制約せずに断熱管の内径を 200mm まで増大させた場合について送電可能距離の検討を行った。ただし、断面積比によって導体部の径が変化し、交流損失や臨界電流値が増大すること、外部からの侵入熱がケーブル外径に応じて増大することを考慮した。また、HTS テープ線は曲げ歪みを 0.3%以下に制約し、臨界電流の劣化は無いものとした。

現在、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」[2]で運転されている三心一括型超電導ケーブルでは、流量 40liter/min. に対し、ケーブルの温度上昇は 100 mあたり約 0.83 K であると報告されている[3]。本研究では、三相同一軸型の冷却特性を明確にするために、上記データを用いて、三心一括型と三相同一軸型の送電可能距離を比較することにした。

3. 解析結果および考察

Fig.2 に断熱管の内径と送電可能距離の関係を液体窒素のフロー方法ごとに示す。(a)は内径を固定した場合(内径: 51.0mm, 歪み率: 0.3%), (b)は流路の断面積比を変化させた場合である。同図より、(a)の場合、並流、向流ともに外側流路が増大するにつれ送電可能距離が増大することがわかる。これは、外側流路断面積を大きくすることによって、並流では侵入熱の影響が低減されたこと、向流では流速の減少により圧力損失が低下したことそれぞれ起因すると考えられる。し

かし、同図より、外径をさらに大きくしても更なる送電可能距離の増大は見込めないことがわかる。これは、外径を大きくすると外側の液体窒素の流速が減少し、ケーブル表面からの侵入熱が大きくなるためと考えられる。流路の断面積比を変化させた(b)の場合、ケーブル外径が大きいところで送電可能距離が増大した。これはケーブル導体部の径を大きくすることで損失が低減し、外側流路の流速が増加し、伝熱特性が改善されたためであると考えられる。また、三心一括型と三相同一軸型の並流における送電可能距離を比較したところ、三心一括型の送電可能距離が約 1.4 km であるのに対し、三相同一軸型では、約 3.5kmと 2 倍以上になった。以上より、三相同一軸型は、三心一括型に比べて長尺化に適していると考えられる。

本研究の一部は、パワーアカデミー研究助成「萌芽研究」の支援を受けて実施されたものである。

Table 1 Specifications of analysis.

Conductor composition	BSCCO 1-layer
HTS tape thickness	0.3 mm
Cu stabilizer thickness	2.2 mm
PPLP® insulation thickness	a-b and b-c 5.5 mm outer side c 3.0 mm
Nominal power	230 MVA
Nominal voltage	66 kV
Transport current	2.0 kA
Internal diameter of corrugate pipe	108 ~ 200 mm
Heat penetration	2.5 ~ 4.6 W/m

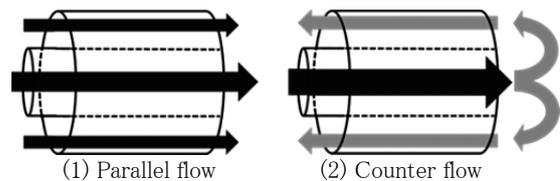


Fig.1 LN₂ flow ways.

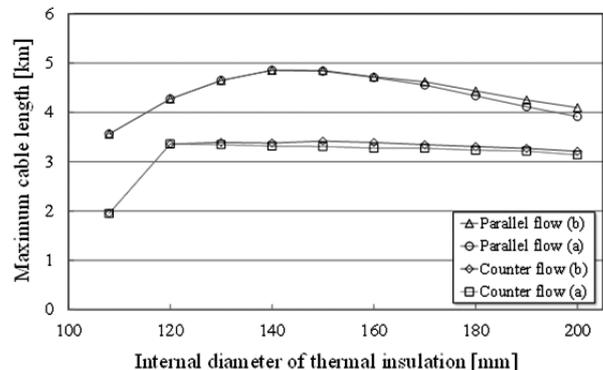


Fig.2 Maximum cable length as a function of internal diameter of thermal insulation.

参考文献

1. M.Akita, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.87 (2013) p.26
2. M.Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.86 (2012) p.11
3. A.Machida, et al.: 2013 National Convention Record IEE Japan p.253(2013)

縦磁界効果を利用した高性能電力ケーブルの設計

Design of high-quality power transmission cable using the longitudinal magnetic field effect

松下 照男, 木内 勝, 小田部 荘司, Vyatkin Vladimir (九工大)

MATSUSHITA Teruo, KIUCHI Masaru, OTABE Edmund Soji, VYATKIN Vladimir (Kyushu Inst. Tech.)

E-mail: matusita@cse.kyutech.ac.jp

1. はじめに

直流超伝導電力ケーブルの電流容量を増加させる方法として、平行磁界下で臨界電流密度が大幅に増加するという縦磁界効果を利用することを提案した[1]。しかしながら、現在の市販の RE 系コート線材では残留する結晶界面によると思われる影響で、臨界電流密度が金属系超伝導体のように縦磁界によって増加する傾向は観測されていない。それでも、縦磁界下の臨界電流密度は通常の横磁界下の値よりも大きくなるので、これを利用して新しい高性能ケーブルを提案した[2]。ここでは、ケーブル構造の最適化を議論した結果について報告する。

2. ケーブル構造の最適化

n 層からなるケーブルを想定し、内側から i 番目の層の超電導線の中心からの距離 a_i 、軸方向からの巻き角度 θ_i を

$$a_i = a + is, \quad \theta_i = \frac{(2i-1)}{2n} \theta_m \quad (1)$$

とする。各層における磁界と超電導線に沿って流れる電流の間の角度を φ_i とし、垂直面内磁界および平行磁界下の臨界電流密度をそれぞれ J_{cM} 、 J_{cM} で表し、 i 番目の層の臨界電流密度を

$$J_c(\varphi_i) = \frac{1}{2}(J_{cM} + J_{cM}) + \frac{1}{2}(J_{cM} - J_{cM}) \cos 2\varphi_i \quad (2)$$

と近似する。外側のシールド導体を流れる電流による軸方向磁界を B_{ext} とし、これと電流の自己磁界による全磁界の関数として電流が与えられる。これを自己無矛盾になるように解き、各層の電流分布ならびにケーブルの電流容量を求めた。得られた電流容量が最大になるように巻き角度 θ_m を決定した。なお、 B_{ext} は内側導体と同じ電流が流れる外側のシールド導体によって作られるため、その大きさに制限がある。

実測したコート線材の臨界電流密度の値を用いて計算した結果の一例を Fig. 1 に示す。なお、縦軸の η は縦磁界効果を用いない従来型ケーブル ($B_{ext} = 0$ かつ $\varphi_i = \pi/2$) との電流容量の比で、これをケーブルの効率とする。実線部分が実現できる B_{ext} の範囲を示し、この範囲内で B_{ext} の増加とともに効率は単調に増加する。これは、 B_{ext} の増加とともに磁界の角度が小さくなることにより臨界電流密度が相対的に増加するからである。この結果によれば、8 層の超電導ケーブルの場合、最適構造をとることによって電流容量を従来型ケーブルに比べ、22%ほど向上させることができる。また、層数 n を大きくすることによって効率は一層、向上する。

3. 検討

現在のコート線材の臨界電流密度が金属系超伝導体のように縦磁界の増加とともに増加するようにするには、 a 軸配向粒などの発生を完全に抑え込む必要があるため、その実現にはかなり時間を要することが予想される。それでも、各線材メーカーが目標としている、自己磁界下の値に代表される臨界電流密度の増加によっても特性は向上する。これはそう遠くない将来において実現すると期待が予想される。この特性向上は単に B_{ext} の増加によるものであるが、実際に J_{cM} お

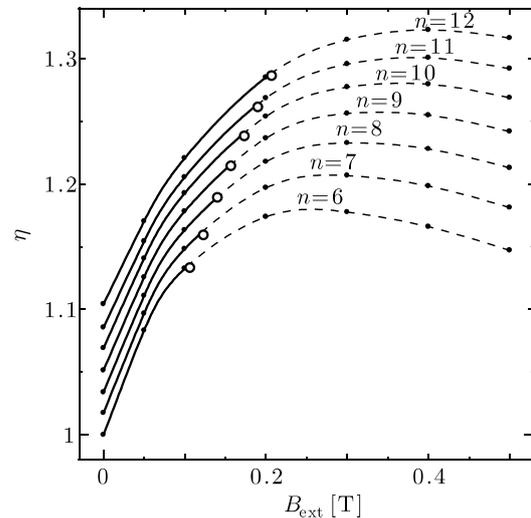


Fig. 1. Cable efficiency vs B_{ext} for various superconducting layer numbers.

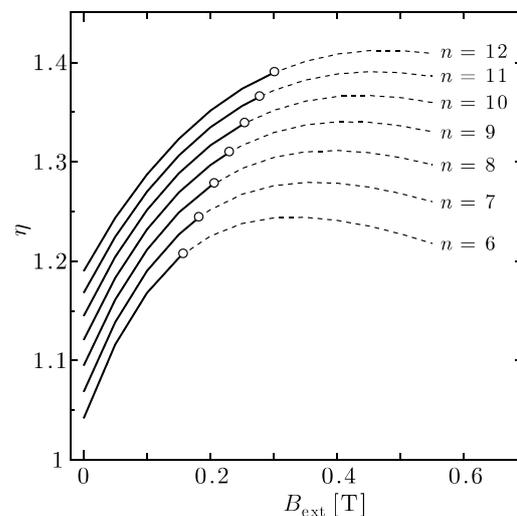


Fig. 2. Cable efficiency when the critical current densities are enhanced by factor 1.5. The open circles show the optimum conditions for each case.

よび J_{cM} が 1.5 倍増加したときのケーブルの効率を Fig. 2 に示す。これによれば、8 層の超電導ケーブルの場合の効率上昇が 22% から 28% に改善される。

参考文献

- [1] T. Matsushita *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 12509
 [2] V. Vyatkin *et al.*, Physica C **494** (2013) 135

275 kV-3 kA 超電導ケーブルの継続試験

A continuation test of 275 kV-3 kA YBCO Superconducting Cable

中山 亮, 八木 正史, 三觜 隆治, 劉 勁, 藤 軍, 野村 朋哉 (古河電工)

NAKAYAMA Ryo, YAGI Masashi, MITSUHASHI Takaharu, LIU Jin, TENG Jun, NOMURA Tomoya (Furukawa Electric)

E-mail: mr252088@mr.furukawa.co.jp

1. はじめに

275 kV-3 kA の YBCO 超電導ケーブルは 1.5 GW という架空送電線に匹敵する大容量で、将来の電力基幹線としての実用化が期待されている。本ケーブルは 2008 年より M-PACC プロジェクトの中で開発を進めてきたもので、2012 年度には瀋陽古河電纜で長期課通電試験を実施し、試験は成功裏に終了した。

2013 年度 3 月からは継続試験を実施しており、ヒートサイクルによるケーブル性能劣化の有無、ブッシングにおける誘電特性、解体時の以上の有無を検証したので結果を報告する。

また、解体したケーブルを日本に持ち帰った後の試験項目についてもまとめる。

2. 長期課通電設備及び長期課通電試験概要

長期課通電設備は中国の瀋陽古河電纜の敷地内に Fig1. に示すように配置されている。構成は主に 30 m ケーブル部、終端部、中間接続部、液体窒素タンク、冷却システムから成り、冷却システムの状態の監視、試験条件の制御は Fig2. に示す制御室で行われ、冷却システムの状態は日本でも閲覧することが可能である。

冷却システムにおいて、超電導ケーブルを冷却する液体窒素は閉ループを構成し、サブクーラの熱交換器を通して冷却される。この冷却能力は 3 kW 以上である。サブクーラ内の液体窒素は排気ポンプで減圧され、飽和蒸気圧が下がることで冷却される。サブクーラの液体窒素は排気ポンプで吸い込まれるので消費され、消費分は液体窒素タンク (Cold Evaporator) から補給される。昨年度実施した試験では、本ケーブルシステムを用い、ケーブル I_c 測定、部分放電試験、誘電損失測定、長期課通電試験を実施した。

3. 継続試験結果

継続試験では、ヒートサイクルの後の各種試験を実施し、異常が無いかを検証した。

昨年度実施した長期課通電試験、今年度実施した継続試験、解体したものを日本に持ち帰った後に実施する試験項目をまとめたものを Table.1 に示す。継続試験の結果、2 回のヒートサイクル後の I_c 低下率は、超電導導体層で 5% 未満、超電導シールド層で 3% 未満であった。また、終端部において誘電損失を実施したところ、異常はみられなかった。最後に、310 kV 課電で部分放電フリーであることを確認した。

継続試験後、ケーブルを解体し、各部品に異常がないことを確認している。解体したケーブルは日本に持ち帰り、古河電工千葉事業所において 1155 kV での雷インパルス試験 3 回、400 kV、30 分の耐電圧試験を実施する予定である。

4. まとめと今後の展望

継続試験として、ヒートサイクル後のケーブル I_c 測定、終端部での誘電損失測定、310 kV 部分放電試験、解体後の目視検査を行い、ケーブルの状態に異常が無いことを確認した。

今後は、解体後のケーブルを日本に持ち帰り、更に試験データを蓄積していく。

5. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。

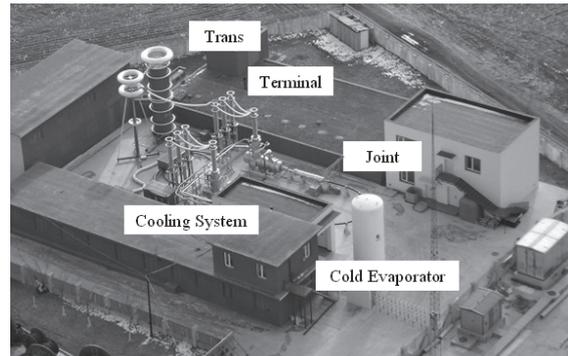


Fig.1 Demonstration System of 275kV - 3kA HTS cable



Fig.2 Control room

Table.1 Items of 30 m cable test

Item	Condition	Result
I_c Conductor / Shield	77 K	6800 A / 7000 A
Partial Discharge (PD)	310 kV - 10min	No - PD
Loss Dielectric / AC	200 kV - 3 kA	0.7 W/m / 0.19 W/m
Long - term electrical test	200 kV - 1 month 3 kA ON/OFF over 20 cycle	Completed
I_c Conductor / Shield after two heat cycle	77 K	Within 5 % deterioration
Partial Discharge (PD) after two heat cycle	310 kV - 10min	No - PD
Loss Dielectric / AC after two heat cycle	200 kV - 3 kA	Good condition
Dissolution test	appearance check by visual contact	Good condition
Imp. test	1500 kV × 3 times	Carried out in Japan
AC withstand voltage test	400 kV × 30 min	Carried out in Japan

参考文献

- R. Nakayama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 87(2013) p.24

単心型交流超電導ケーブル断熱管の渦電流損失 Eddy Current Loss of Cryostat Pipe of HTS Power Cable

渡辺 和夫, 日高 輝, 明石 一弥, 大保 雅載, 飯島 康裕, 永田 雅克, 吉田 学, 伊藤 雅彦, 斉藤 隆 (フジクラ)
 WATANABE Kazuo, HIDAKA Hikaru, AKASHI Kazuya, DAIBO Masanori, IJIMA Yasuhiro,
 NAGATA Masakatsu, YOSHIDA Manabu, ITO Masahiko, SAITO Takashi (Fujikura Ltd.)
 E-mail: kazuo.watanabe@jp.fujikura.com

1. はじめに

一般に超電導ケーブルは導体とシールド層の各層線材がスパイラルに巻かれ、多重コイル構造となることから内部軸方向磁界が存在する。これにより単心型交流超電導ケーブルでは、断熱管内に軸方向の鎖交磁束が生じ、渦電流損失が発生する。この磁束(損失)の大きさは各層の撚り方向、撚りピッチ及び電流の大きさに依存し、大電流化とともに顕在化してくると考えられる。今回、断熱管の渦電流損失の計算式を導出し、実測値との比較検討を行ったので概要を報告する。

2. 渦電流損失計算式

二重 SUS 断熱管の寸法を表 1 に、コルゲート形状を図 1 に示す。コルゲート形状を正弦波形式とみなして、幅 dx の微小リングを考える。このリング内を環状電流が誘導されジュール損が発生する。微小リングの環状抵抗 dR は(1)式となり、SUS の場合は渦電流回路の自己インダクタンスは無視できるので、微小リングの渦電流損失 dW_{eddy} は、(2)式となる。これを 1 ピッチあたり積分して単位長当たりの渦電流損失が(3)式から求まる。

$$dR = \rho \frac{2\pi y}{t dx} = \rho \frac{2\pi y}{t \sqrt{1+y'^2} dx} \dots\dots (1)$$

$$dW_{eddy} = \frac{|d\Phi/dt|^2}{dR} = \frac{(\omega\Phi)^2}{dR} \therefore W_{eddy} = (\omega\Phi)^2 \int \frac{1}{dR} \dots\dots (2)$$

$$W_{eddy} = (\omega\Phi)^2 \frac{t}{2\pi\rho} \frac{1}{p} \int_0^p \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{h\pi}{p}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi}{p}x}}{\frac{h}{2} \sin \frac{2\pi}{p}x + r_{mean}} dx \dots\dots (3)$$

ここに、 $\omega=2\pi f$ 、 ρ : SUS の体積抵抗率
 ここで、 $h \ll 2r_{mean}$ の場合には(4)式に簡略される。

$$W_{eddy} = \frac{4\pi \cdot f^2 \cdot \Phi^2 \cdot t \cdot h}{\rho \cdot r_{mean} \cdot p \cdot k} \cdot E(\pi/2, k) \dots\dots (4)$$

$E(\pi/2, k)$ は第二種完全楕円積分で母数 k は(5)式で表される。

$$k = \left(\frac{h\pi}{p}\right) / \sqrt{1 + \left(\frac{h\pi}{p}\right)^2} \dots\dots (5)$$

3. 渦電流損失の実測値と計算値の比較

表1に示す寸法の二重 SUS 断熱管を対象に渦電流損失の実測値と計算値を図 2 に示す。実測は断熱管の内管と外管とも実験の都合上液体窒素中に浸漬し測定した。平滑パイプとしての計算値は実測値の約 70%と小さいが、コルゲート形状を反映した計算値は実測値とほぼ一致している。

この式をもとに実使用時の試算例として、対象ケーブル: 導体4層、シールド2層、導体下径22mm、シールド下径40mm、断熱管は表1のものとして、周波数50Hz、通電電流5000Aの場合を考える。想定ケースは、(ケースI) 全て S 撚りで均流化設計、(ケースII) 全て S 撚りで偏流の場合、(ケースIII) 導体 S 撚り&シールド Z 撚りで均流化設計。このときの断熱管内部軸方向の鎖交磁束数は図 3 中の矢印で示した。ケーブル損失目標値を数 W/m とした場合、ケースII、IIIでは無視できないレベルとなっている。単心ケーブルの場合、今後大電流化とともに断熱管の渦電流損失の重要性も増してくると考えられる。

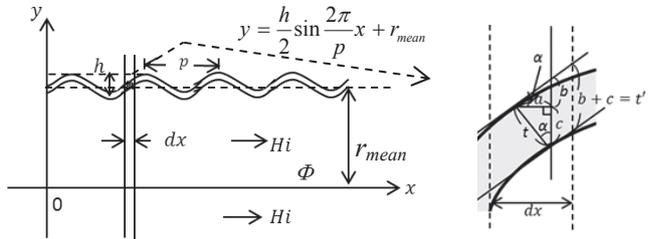


Fig.1 Shape of Corrugated Pipe

Table 1 Dimensions of Cryostat Pipe

Item	Inner pipe	Outer pipe
Inner diameter (mm)	64	100
Outer diameter (mm)	70	110
Mean diameter 2r _{mean} (mm)	67	105
Height/corrugate shape h (mm)	2.5	5
Pitch/corrugate shape p (mm)	7.5	9
Thickness t (mm)	0.5	0.6

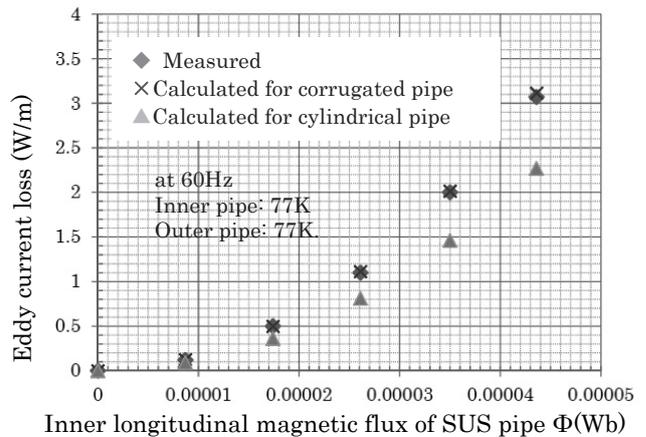


Fig.2 Comparison of Measured and Calculated Results for Eddy Current Loss of SUS Cryostat Pipe

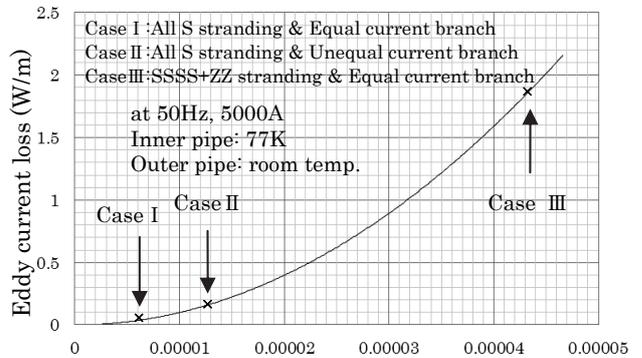


Fig.3 Estimated Result of Eddy Current Loss of SUS Cryostat Pipe for Actual Use

66kV 級大電流イットリウム系高温超電導ケーブルの交流損失

AC Loss of 66kV Class Yttrium-based HTS Power Cable with Large Current Capacity

渡辺 和夫, 日高 輝, 明石 一弥, 大保 雅哉, 菊竹 亮, 飯島 康裕,
 永田 雅克, 吉田 学, 伊藤 雅彦, 齊藤 隆 (フジクラ); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)
 WATANABE Kazuo, HIDAKA Hikaru, AKASHI Kazuya, DAIBO Masanori, KIKUTAKE Ryo,
 IJIMA Yasuhiro, NAGATA Masakatsu, YOSHIDA Manabu, ITO Masahiko, SAITO Takashi (Fujikura);
 MARUYAMA Osamu, OKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)
 E-mail: kazuo.watanabe@jp.fujikura.com

1. はじめに

「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の最終年度に、フジクラでは高 $I_c=500$ A/cm-w(@77K, s.f.)級線材 (IBAD-PLD 線材) を 66 kV / 三心一括 / 5 kArms 級ケーブルに適用した。ケーブル1相分約 25m を作製し、終端接続部と冷却システムを有する約 22m 長の通電実証線路を構築して実際のケーブル状態での交流損失を実測した。高 I_c 線材からなる導体に期待される高特性を検証することができたのでその概要を報告する。

2. 大電流・低交流損失ケーブルの試作・評価

ケーブル構造は NEDO プロジェクトの成果[1]に準拠して設計した(図 1、表 1)。導体、シールドの線材は全て 4 mm幅とし、1 本当たりの平均 I_c はそれぞれ 260A/4mm-w、243A/4mm-w で、1 cm 幅換算で 650 A/cm-w、610 A/cm-w となり、これまでに類のない高 I_c 線材の初適用となった。ケーブル製作前後でのトータル線材 I_c の変化のないこと、また製造余長の短尺サンプルで導体・シールドの各層電流の均流化を確認した。その後、交流損失を測定して 77K にて目標損失 2.0 W/m(@5 kArms)以下を確認した(図 3 中の●印)。

3. 交流通電特性の検証

図 2 の試験線路は約 22m のケーブル、終端接続部及び冷却システムからなる。二つの通電末端は一つの断熱容器内に収める構造とした。これはシールドに導体と同じ大きさの電流が誘導されるよう、シールド短絡部を LN₂ 中で極力短くしてインピーダンスを抑制するためである。試験条件は、「交流通電試験(非課電) 20 サイクル(1 サイクル=8h 通電/16h 非通電)、通電電流 1kA~3kArms、運転温度 73K」とし、初期は~3kArms、20 サイクル後は~5kArms の交流損失を測定した。導体通電時には HTS シールド層には導体電流の約 98%の電流が誘導され(図 2)、設計通りであることが確認された。

交流損失測定はあらかじめケーブル製造時に導体上に取り付けた測定長 8m×2=16m の電圧リードを容器外に引き出し、電氣的交流四端子法にて測定した。交流損失測定結果を短尺コアの結果とともに図 3 に示す。77K において今回の目標である 2.0 W/m(@5kArms)以下を確認した。更に、67K において目標損失値の半減以下を確認した。

4. あとがき

イットリウム系高 I_c IBAD-PLD 線材を適用した HTS ケーブルで交流通電特性を検証し、液体窒素温度が実用的な 77K において目標の大電流・低損失化が十分可能であることが初めて確認された。これは、実線路での冷却システム設計の温度条件を現実的なものとする期待される。

謝辞

本研究は NEDO の委託により実施したものである。

参考文献

- M. Ohya, et al. : Abstracts of CSJ Conference, Vol. 84 (2011) p. 189

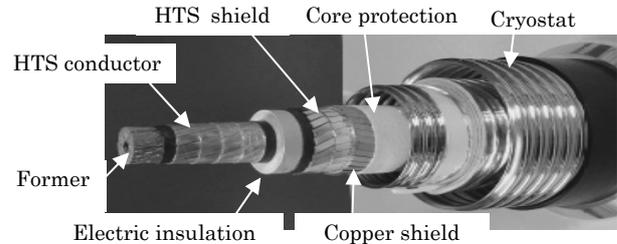


Fig.1 22m Yttrium-based IBAD-PLD HTS Cable

Table 1. Components of 22m Yttrium based IBAD-PLD Cable

Component	Specifications
Former	Stranded Copper wires(140mm ²) 20mmφ
HTS conductor ($I_c=14$ kA)	4layers, All 4mm-w tapes ($I_c=240$ A/4mm)
Electric insulation	Craft papers(6mm-t)
HTS shield ($I_c=12.7$ kA)	2layers, All 4mm-w tapes ($I_c=240$ A/4mm)
Copper shield	Copper tapes(100mm ²)
Core protection	Nonwoven tapes 45mmφ
Cryostat	Double corrugated SUS pipes
Jacket	PE 114mmφ

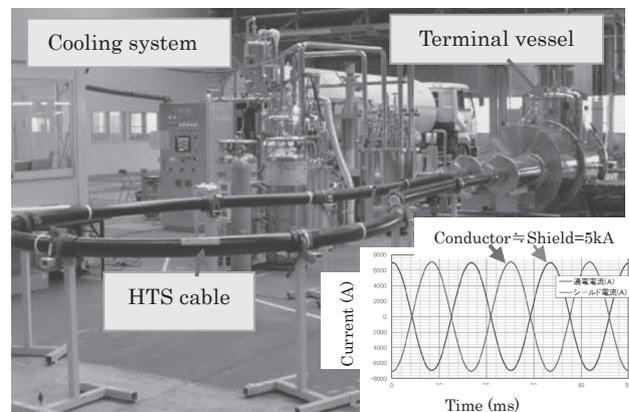


Fig.2 22m HTS Cable System of Current

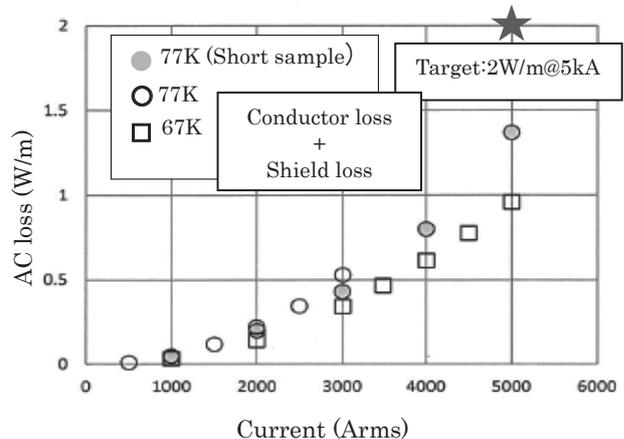


Fig.3 Measured AC Loss out of 16m Portion of 22m Cable

鉄道用超伝導ケーブルを用いた電車走行試験 Train Running Test Using Superconducting DC Cables for Railway Systems

富田 優, 小林 祐介, 赤坂 友幸, 石原 篤, 福本 祐介, 鈴木 賢次(鉄道総研)
 TOMITA Masaru, KOBAYASHI Yusuke, AKASAKA Tomoyuki, ISHIHARA Atsushi,
 FUKUMOTO Yusuke, SUZUKI Kenji (Railway Technical Research Institute)
 E-mail: tomita@rtri.or.jp

1. はじめに

鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの合理化および省エネルギー化を目的として、鉄道用超伝導ケーブルの開発を進めている。超伝導ケーブルを鉄道の送電線に適用することで、回生効率の向上、電力損失の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下の低減による変電所の集約化、電圧補償や電食の抑制などが期待できる。

本講演では各種検討結果を踏まえ、DC1.5 kV、5 kA 長の30 m 級鉄道用超伝導ケーブルのプロトタイプを製作し、構内試験線で走行試験を開始したので報告する。

2. 電車走行試験

鉄道用超伝導ケーブルシステムはコンパクト、高信頼度などが要求されるので、超伝導ケーブルは対向流循環方式、冷却システムは一体型冷却システムを採用した[1]。

鉄道総研内の構内実験線に敷設した超伝導ケーブルシステムにおいて、冷却試験、通電試験 (Fig.1)、耐電圧試験などを行い、健全性を確認した。後に Fig.3 に示す電気回路で走行試験 (Fig.2) を行った。超伝導ケーブルを介して、鉄道車両に電力を供給することができ、電車を走らせることに成功した。今後は更なる耐久性試験を行い、運用上の課題、問題点を抽出し、鉄道事業用として、費用対効果も含め十分に適用可能な超伝導ケーブルを実現させ、営業線への導入を目指していく。

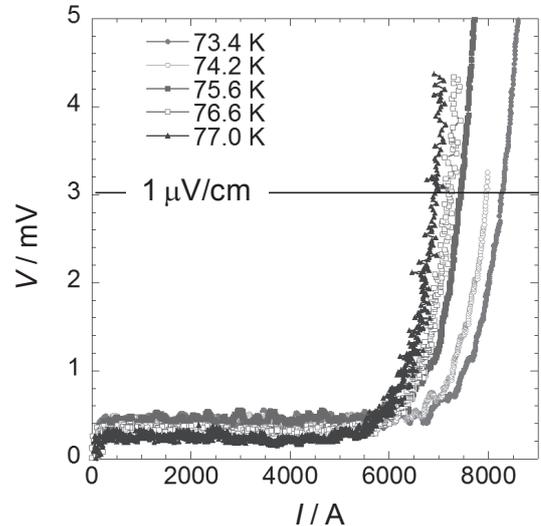


Fig.1 Electrical current test of 30-m superconducting DC cables

3. 謝辞

本研究は研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム (S-イノベ)」の支援を受けて進めたものである。

参考文献

[1] 富田優 ほか, 第87回低温工学・超電導学会 p.20 (2013).

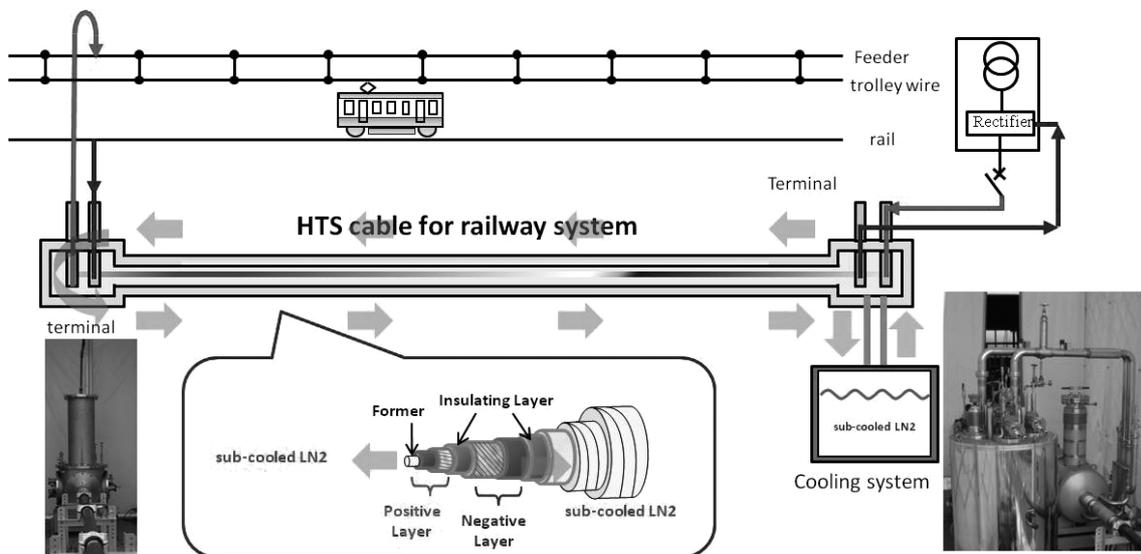


Fig.3 Superconducting DC cables for railway systems

高温超電導ケーブルの実証試験

In-grid demonstration of high-temperature superconducting cable

渡部 充彦, 大屋 正義, 増田 孝人 (住友電工);

下田 将大, 仲村 直子, 矢口 広晴, 町田 明登 (前川製作所);

中野 哲太郎, 丸山 修, 本庄 昇一 (東京電力)

WATANABE Michihiko, OHYA Masayoshi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);

SHIMODA Masahiro, NAKAMURA Naoko, YAGUCHI Hiroharu, MACHIDA Akito (Mayekawa Mfg. Corporation);

NAKANO Tetsutaro, MARUYAMA Osamu, HONJO Shoichi (Tokyo Electric Power Company);

E-mail: m-watanabe@sei.co.jp

1. はじめに

平成 19 年度より開始された「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」において、66kV 級の高温超電導ケーブルシステムを東京電力株式会社の旭変電所(神奈川県横浜市)内に構築し、実系統に連系した実証試験を行うことで、線路設計、建設、運転および保守を含めたトータルシステムの安全性と信頼性を評価する。2012 年 10 月より実系統運転を開始し、現在約 1 年以上にわたる運転を実施している。今回はケーブルシステム並びに冷却システムの運転特性、制御特性、保守などについての報告を行う。

2. 実証運転

2.1 送電時の特性

送電開始前、2 回の循環冷却試験を実施し、Ic や課電特性などの超電導ケーブル特性試験および冷却システムの運転評価試験を実施し、それぞれ所定の性能を有することを確認した[1],[2]。3 回目の冷却を実施し、警報システムの動作最終確認などを実施したのち、昨年 10 月 29 日より実系統送電を開始した。図1に送電開始時の送電電流、液体窒素のケーブル出入口温度、流量の推移を示す。液体窒素温度は冷凍機台数制御により循環冷却系のケーブル入口温度を 69±1K で制御され、送電電流の日間変動や系統操作による急な電流変化に対しても安定した制御が行われていることを確認した。

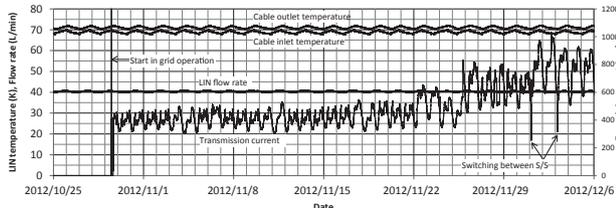


Fig.1 Example of in grid operation.

2.2 熱負荷特性

系統運転中のケーブルシステム熱負荷変動を図2に示す。外気温や送電電流の変化により熱負荷も変動し、約 2300~2600W で推移している。送電開始前に実施した無負荷熱損失をベースにし、液体窒素温度、外気温の変化や課通電による電気損失を考慮した計算式により予想熱負荷を求め実測値と比較した結果、両者がよく一致することを確認した。

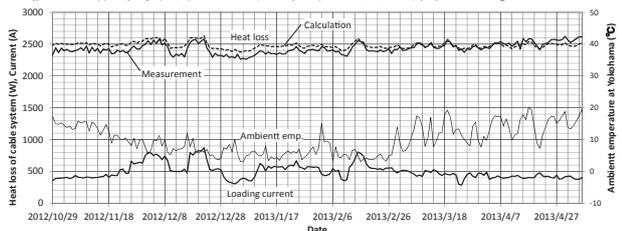


Fig.2 Heat loss characteristics.

2.3 Ic 測定

2 相往復通電による各相の Ic 測定を実施した。図3にはケー

ブルシステム組立後に実施した最初の冷却試験から、送電開始後 9 ヶ月経過した時点までの各 Ic 測定結果を示す。各相とも Ic の測定結果に大きな差は見られず、ケーブルの製造、布設、長期運転を経ても導体特性に変化が見られないことを確認した。

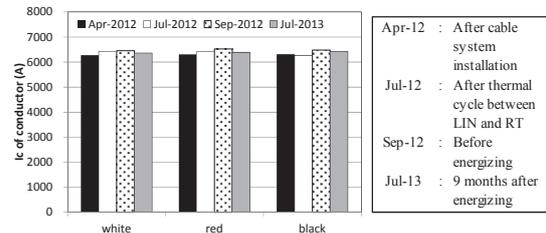


Fig.3 Ic retention at each operation phase

3. 冷凍機メンテナンス

本プロジェクトで採用したスターリング式冷凍機および液体窒素循環ポンプはそれぞれ約 8000 時間毎に定期メンテナンスを実施することが推奨されている。各冷凍機、ポンプにはバイパスラインが設けられており、バルブの開閉操作により循環冷却を停止することなく当該機器を循環ラインから切り離し、メンテナンス後再度循環ラインに接続することが出来るようになっている。実系統運転中にこれらを確認するためメンテナンス作業を実施した。図4に冷凍機の交換作業における液体窒素温度、循環流量の変化を示す。作業は冷凍機切離し・昇温、冷凍機交換、再接続を含め 2 日間で実施され、この間温度、流量、圧力に大きな変動はなく、想定どおり系統運転を継続したままメンテナンス機器の入替えが可能であることを確認した。

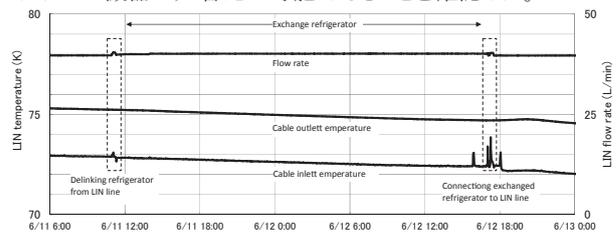


Fig.4 Temperature and flow rate fluctuation at maintenance

4. さいごに

送電開始から 1 年が経過し、トラブル無く順調に運転が継続されている。年度内に送電停止、昇温作業などを実施し本プロジェクトを完了する予定である。

謝辞

本研究の一部は、NEDO の委託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.86 (2012) p.11
2. R. Ono, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.87 (2013) p.160