超電導 Web21
Superconductivity

超電導 Web21

財団法人　国際超電導産業技術研究センター　〒135-0062　江東区東雲 1-10-13　Tel: 03-3536-7283　Fax: 03-3536-5717

2011 年 **9** 月号　　2011 年 9 月 1 日発行

掲載内容（サマリー）：

トピックス
○「希少金属代替材料開発プロジェクト成果報告会」報告
○鉄系超電導体の線材応用の可能性に明るい展望

○超電導関連 2011 年 9-10 月の催し物案内
○新聞ヘッドライン（7/19-8/18）
○超電導速報―世界の動き（2011 年 7 月）
○標準化活動　8 月のトピックス
○「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会」報告
○第 14 回極低温検出器国際ワークショップ報告
○隔月連載記事－イットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 5）
○読者の広場(Q&A)－275 キロボルトに耐えられる世界最高電圧の超電導（線）ケーブルを開発したという新聞記事がありましたが、どういう技術により可能になったのでしょうか。また、どういう応用が期待されるでしょうか?

超電導 Web21 トップページ

超電導 Web21
〈発行者〉
財団法人　国際超電導産業技術研究センター　超電導 Web21 編集局
〒135-0062　東京都江東区東雲 1-10-13
Tel (03) 3536-7283　　Fax(03) 3536-5717
超電導 Web21 トップページ：http://www.istec.or.jp/web21/web21.html

この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。
http://ringring-keirin.jp

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity

超電導 Web21

2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

トピックス：「希少金属代替材料開発プロジェクト成果報告会」報告

産業用超電導線材・機器技術研究組合
技術開発部長代理
定方伸行

平成 23 年 8 月 9 日、ISTEC 大会議室において「希少金属代替材料開発プロジェクト(Nd-Fe-B 系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発：超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発)」成果発表会が開催されました。このプロジェクトは平成 21 年度から平成 23 年度に、産業用超電導線材・機器技術研究組合（略称 iSTERA、組合員：㈶国際超電導産業技術研究センター、㈱フジクラ、昭和電線ケーブルシステム㈱)）、東北大学、名古屋大学、九州大学、早稲田大学が (独)新エネルギー・産業技術総合開発機構より受託し実施したものです。

イットリウム系複合材料は、希少金属である希土類元素含有密度が低く、積層型テープ形状の薄い超電導層に数百アンペアの大電流を流せることから、希土類元素を含む永久磁石を用いる回転機において、イットリウム系複合材料により構成した電磁石を永久磁石に置き換えることで、軽量かつ高効率なモータ部材に将来的に代わる可能性があると期待されています。

成果報告会では、①超長尺イットリウム系複合材料における希少金属使用量低減技術開発、②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発、③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発、の各テーマについて成果が報告されました。具体的には、テーマ①では、1 km の平均 I_c が 200 A/cm 幅以上であること、10 m 長以上で I_c が 300 A/cm 幅以上を実証したこと、テーマ②では、全成膜領域の静止成膜により原料収率 40 %以上を実証、移動成膜により成膜量を実証したこと、テーマ③では、設計用シミュレータを開発し希土類元素使用量が 1/130 に低減できることを示したこと、傘型界磁モデルコイルを製作し回転機設計の見通しがたったこと、液体 Ne を用い高速回転時 30 K 安定冷却と界面の熱伝達係数を得て冷却設計の見通しがたったこと、等により、目標が達成されたことが報告されました。今後は超長尺イットリウム系複合材料の量産・事業化への基盤を確立するとともに、産業用超電導機器の実用化に向けた研究開発により希少金属使用量の削減と高温超電導産業の拡大・新市場創出を目指して参ります。

成果概要

テーマ名	目標	達成度
①超長尺イットリウム系複合材料における構造・特性の高度化による希少金属使用量低減技術開発	300A/cm幅（@77 K、自己磁場）の特性を有し、1 kmを超える超長尺複合材料作製を見通す。	○達成 ・1km長線材において平均 Ic>300A/cm幅 ・10m→400A
②イットリウム系複合材料の製造工程における希少金属利用率等の効率向上技術開発	超電導層の連続形成プロセスにおいて原料収率40%以上を見通す。	○達成 ・原料収率 56% (Jc>0.5MA/cm²)
③イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	ｲｯﾄﾘｳﾑ複合材料による500kW級-1000rpm級回転機の優位性を見通す。	○達成 ・500kW概念設計 →希土類使用量＜1/130 ・傘型コイル及びサーモサイフォンの成立性を確認

今後の展開

超長尺(１ｋｍ長)線材の作製技術
→超長尺量産体制確立へ

Ｙ系超電導回転機開発の指針提示

(回転機)継続研究→実用化へ展開

(波及効果)各種機器実用化を促進

希少金属使用量削減

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

トピックス：鉄系超電導体の線材応用の可能性に明るい展望

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
副所長　田辺圭一

超電導体の結晶粒界の性質は、超電導線材への応用を図る際に大きな鍵となる。日本学術振興会「最先端研究開発支援プログラム」の一環として、東京工業大学フロンティア研究機構の細野秀雄教授の研究グループは、(財) 国際超電導産業技術研究センターの研究グループと共同で、鉄系超電導体が銅酸化物系よりも優れた結晶粒界の特性を有していることを明らかにし、さらに金属テープ基板上への高性能薄膜の試作に成功したことをこの度発表した。

3 年前に細野グループが報告した鉄系超電導体は、現在その最高転移温度が銅酸化物に次ぐ 56 K に達しており、かつ 50-100 T の大きな上部臨界磁場と銅酸化物に比べ小さな異方性を有するため、金属系超電導線材を超える大きな磁場を発生するマグネットなどへの線材応用に期待が寄せられている。

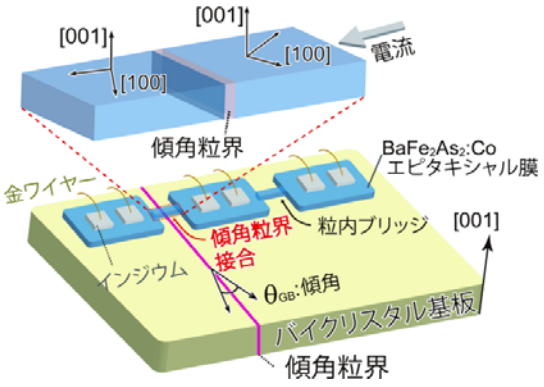

図 1 バイクリスタル基板上に作製した Co 添加 $BaFe_2As_2$ エピタキシャル薄膜に、電流－電圧特性を評価するためのブリッジ構造（傾角粒界接合）を形成。ピンク色の線がバイクリスタル基板の傾角粒界部で、上図はそこを介して形成される傾角粒界接合の拡大図。

今回、同グループは、パルスレーザー堆積法を用いて、3 度から 45 度の傾角を有するバイクリスタル基板上に高品質な Co 添加 $BaFe_2As_2$ エピタキシャル薄膜（T_c は約 21 K）を作製し、$BaFe_2As_2$ の傾角粒界を人工的に形成した。そして粒界特性を調査するため、傾角粒界を横断する方向にブリッジ構造（傾角粒界接合）を作製し（図 1）、4 K および 12 K での電流－電圧特性からその傾角粒界における臨界電流密度を評価した（図 2）。その結果、臨界電流密度は約 9 度の傾角（図 2 中矢印の位置）まで 1 MA/cm^2 以上の高い値を保持することが明らかとなった。この臨界角 9 度という値は、同様の方法でこれまで調べられている Y 系銅酸化物の値 3～7 度よりも大きい。また、この臨界角を超えても臨界電流密度が急激に低下しない（赤線と青線）。その結果、30 度以上の高傾角粒界においては、4 K において銅酸化物を凌ぐ臨界電流密度を有することがわかった。これらの結果は、鉄系超電導体の場合は、特性維持のために要求される結晶配向の制約が 9 度まで許容され、大きく緩和されることを意味する。実際に銅酸化物で近年用いられているものよりも品質の低い 7 度以上の面内配向度をもつ IBAD-MgO 中間層付き金属基板（米国ロスアラモス国立研究所提供）上に薄膜成長を行ったところ、その粒界特性によって、単結晶基板上と同等の 1 MA/cm^2 以上の高い臨界電流密度（最高で 3.5 MA/cm^2）を示す超電導薄膜を得ることにも成功した（図 3）。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

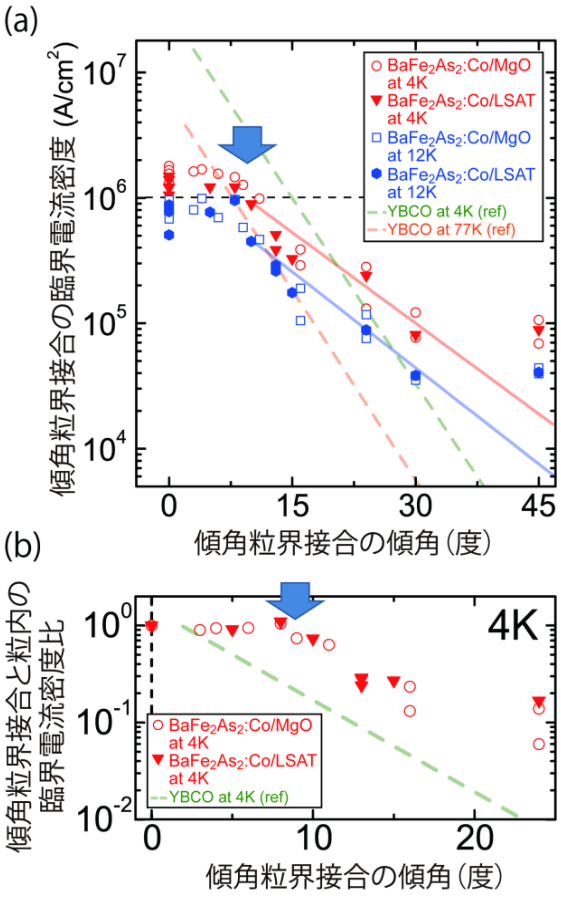

図 2 (a)鉄系超電導体傾角粒界接合における臨界電流密度の傾角依存性 (b) 傾角粒界接合と粒内ブリッジ（傾角粒界を含まない部分）との比。MgO、LSAT 両方の傾角粒界接合で同様の傾向が観察され、図中矢印の臨界角 9 度の傾角までその 1 MA/cm^2 を超える臨界電流密度が維持されることが明らかとなった。この臨界角は銅系酸化物（3～7 度）より大きい。

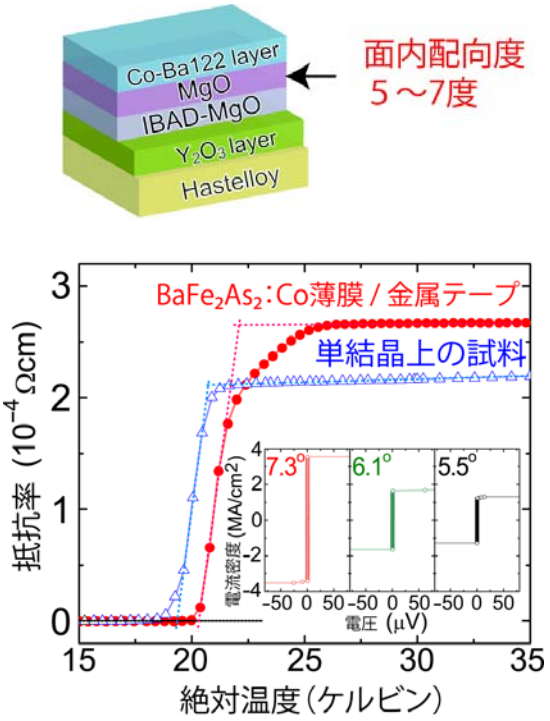

図 3　5 度以上の面内配向度をもつ金属テープ基板上に形成された Co 添加 $BaFe_2As_2$ 薄膜の超電導特性（赤）。比較のために単結晶上の試料の特性（青）も示した。挿入図は用いた金属テープ基板の面内配向度と Co 添加 $BaFe_2As_2$ 薄膜の 2 K における電流密度－電圧特性。どの試料もすべて 1 MA/cm^2 以上（最大 3.5 MA/cm^2）と、単結晶基板上の薄膜と同等の臨界電流密度を有している。

鉄系超電導体は現状で銅酸化物より T_c が低いため、同じ温度で比較すると、T_c が 90 K 以上の Y 系銅酸化物薄膜の方が高い臨界電流密度の値を示すが、特性の異方性が小さいこと、磁場に対して強いことに加え、その臨界角が大きいことが明らかになったことで、線材応用、特に低温で金属系超電導体より高い磁場発生を可能とする線材への応用に向けたポテンシャルの高さが示された。今後は、実際に磁場中で高い臨界電流密度を実現するための最適な人工ピン材料の探索や導入方法の研究を加速していく予定である。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

今回の結晶粒界特性に関する成果は、8 月 3 日（現地（ロンドン）: 8 月 2 日）に「Nature Communications」に掲載された（Nat. Commun. 2:409 doi: 10.1038/ncomms1419 (2011).）。また、金属基板上の薄膜に関する成果は、「Applied Physics Letters」に掲載された（Appl. Phys. Lett. 98, 242510 (2011).）。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

超電導関連 9 月-10 月の催し物案内

8/29-9/2
応用物理学会
場所：山形大学
問合せ：http://www.jsap.or.jp/index.html

9/4-9
2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC´11)
場所：Kursaal, San Sebastian, Spain
問合せ：http://www.ipac-2011.org/inicio.asp

9/12-16
22nd International Conference on Magnet Technology (MT-22)
場所：Marseille, France (Parc Chanot)
問合せ：http://www.mt22.org/conference-program

9/13-16
電子情報通信学会　2011 年ソサイエティ大会
場所：北海道大学
問合せ： http://www.toyoag.co.jp/ieice/S_top/s_top.html

9/18-23
ICMC 2011-Superconductivity Centennial Conference EUCAS-ISEC-ICMC-2011
場所：The Hague, the Netherlands
問合せ：http://www.icmc2011.org/

9/21-24
日本物理学会 2011 年秋季大会（物性関係）
場所：富山大学五福キャンパス
問合せ：http://wwwsoc.nii.ac.jp/jps/jps/bbs/meetings.html

10/12
超伝導エレクトロニクス研究会　10 月研究会（超伝導エレクトロニクス基盤技術及び一般)
場所：機械振興会館
問合せ：http://www.ieice.org/es/sce/jpn/

10/10-14
13th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems
場所：Grenoble, France
問合せ：http://icalepcs2011.esrf.eu/

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

10/11-13
Tenth EPRI Superconductivity Conference
場所：Tallahassee, FL, USA
問合せ：
http://www.cvent.com/events/tenth-epri-superconductivity-conference/event-summary-0ac856fa88e84a97ac2058094d0a4629.aspx

10/24-26
第 24 回国際超電導シンポジウム (ISS2011)
場所：タワーホール船堀（東京都江戸川区）
問合せ：http://www.istec.or.jp/ISS/index.html

10/31-11/1
The 20th International Superconductivity Industry Summit (ISIS-20)
場所：Konjiam Resort, Gyeonggi-do, South Korea
問合せ： http://eng.super-kics.or.kr/conference

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

新聞ヘッドライン（7/19-8/18）

○中国、レアアース高に懸念　海江田経産省と会談「対応検討」　Fuji Sankei Business i.　7/19
○レアアース譲歩を示唆　中国商務省「輸出枠調整も」　朝日新聞　7/19
○レアアース　中国、投機を監視　経産相に商務相表明　輸出枠でも譲歩示唆　日本経済新聞　7/19
○レアアース　中国　高騰に対応検討　日中経産相会談　輸出枠に含み　毎日新聞　7/19
○レアアースの乱　プリウス直撃　中国江西省の産地、採掘停止　日経産業新聞　7/19
○レアアース、新基準対応でさらに高騰へ　Fuji Sankei Business i.　7/22
○鉄系高温超伝導体の超伝導阻害要因発見　東北大・中山助教ら米中と共同　科学新聞　7/22
○ITER　核融合反応予定通り　本島機構長　2027 年に 50 万キロワット級　電気新聞　7/25
○「レアアース供給増」中国首相　河野前衆院議長に意向　毎日新聞　7/25
○「地球電力網」日の出前　超電導ケーブル実用化へ　Fuji Sankei Business i.　7/25
○熱帯びる誘致合戦　次世代直線型加速器　日刊工業新聞　7/25
○レアアースが太平洋にあったの？海底の泥から見つかった。採取ルールが必要だ。　朝日新聞　7/27
○レアアース、一段と高騰　ジスプロシウム 6 月末比 2 倍　ネオジムは 5 割高　日刊工業新聞　7/28
○超電導リニア　安全で高速　世界への提案　読売新聞　7/31
○洋上風力発電、適地も十分　普及へ政府が立地促進を　日経産業新聞　8/01
○レアアース高騰止まらず　需要家、安定調達を優先　日本経済新聞　7/30
○科技 5 年計画案　核融合、一転「推進」に　日本経済新聞　8/01
○節電素材で増す存在感　住友電工　安定した超電導電線　日経産業新聞　8/03
○鉄系超電導体　送電線応用に光　東工大など　銅系しのぐ臨界電流密度　日刊工業新聞　8/03
○鉄系超電導材　強力磁石作りやすく　東工大と ISTEC　電流測定で確認　日経産業新聞　8/04
○革新的な新技術開発へ　4 領域で 4 拠点構築　来年度から新プロジェクト　文科省　科学新聞　8/05
○眠れる資源、実用化急ぐ　海に浮かぶ風力発電　国立公園の地熱利用　日本経済新聞　8/05
○蓄電　コストの壁　読売新聞　8/06
○リニア　長野県中間駅案　「飯田・高森」周辺を提示　JR 東海　日本経済新聞　8/06
○世界を狙う発電用風車　読売新聞　8/08
○JR 東海　リニア中央線中間駅決定　長野県は飯田・高森エリア　日刊工業新聞　8/08
○カルシウム　220 万気圧で超電導　マイナス 240 度 C　阪大などが観測　日刊工業新聞　8/08
○超電導研究の 3 課題を選出　日欧共同支援で JST　日経産業新聞　8/09
○点検シェア攻防　風力発電量　上位 2 社と下位の差開く　日経産業新聞　8/09
○レアアース争奪日本の針路　細る輸入　苦渋の中国生産　日経産業新聞　8/10
○レアアース輸出制限　国内政治事情絡む　技術移転進める思惑も　日経産業新聞　8/10
○鉄系超伝導体　優れた結晶粒界特性明らかに　科学新聞　8/12
○鉄系超電導体の転移温度　上昇抑制原因を特定　日刊工業新聞　8/18

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

超電導速報―世界の動き（2011 年 7 月）

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員　蓮尾信也

線材

Zenergy Power plc（2011 年 7 月 26 日）

ゼナジーパワー社 は次世代高温超電導線材（2G HTS 線材）の開発に更なる進展があったと発表。さらに、2G HTS 線材製造時のリール･ツー･リールを用いた連続化学成膜プロセスがより一層高度化されるよう、その改良資金として新しく 350 万ユーロの補助金が授与されたことも併せて発表した。当社は従来からこの製造方法を使用し、一貫して長さ 100 メートルの 2G HTS 線材を生産し続けている。その品質はゼナージー社の磁気式ビレットヒーターや限流器での使用にも十分なものと言われている。また補助金はドイツ連邦経済技術省 (BMWi)から授与されたもので、線材のさらなる改良とオンラインモニタリングの開発、また将来大量生産するために必要な、品質管理技術の開発とその標準化ための助成金として使用される。この開発プロジェクトにかかる必要経費は総額 600 万ユーロが見積もられ、プロジェクト完了までの期間は 3 年以内である。
出典：
Source: “2G HTS wire performance progress and €3.5m grant from German Government”
Zenergy Power plc press release (July 26, 2011)
http://www.zenergypower.com/images/press_releases/2011/2011-07-26-2g-performance-progress-and-grant-from-german-government.pdf

表彰

Air Products（2011 年 7 月 7 日）

エアープロダクツ社は、フィリップス社より納入業者賞の一つである「Innovation for Growt h 2010」賞を受賞した。これはニューヨーク州レイサムにあるフィリップス社製造施設においてフィリップス社と提携事業を推進する中、ヘリウム使用量削減に向けた努力が認められたものである。提携事業を行うことで、エアープロダクツ社は満足度の高い顧客維持を達成できた。一方、フィリップス社においては、運営及びコストの面でのシナジー効果が実現された。この提携事業の成功を踏まえ、エアープロダクツ社においては MRI のような超電導を利用する装置の冷媒としてのヘリウム事業が拡大し、また、その他様々な製品市場への需要が伸びると期待されている。そのため両社は MRI 製造工程への設備投資を強化して、工場内におけるヘリウムガス回収及びリサイクル使用の可能を促進するための新しいシステムを建設中である。予定されている 2012 年夏にこのシステムが稼働した際には、フィリップス社が購入するヘリウム量は大幅に削減される見込みである。上述の賞の贈与者を選定した理由を、フィリップス社は次のように述べた。「ヘリウム価格の値上げ圧力が強まる厳しい市況下で、エアープロダクツ社は我々との提携事業を進めるなか、その値上げ圧力を沈静化させるため、レイサム工場の事業リストラを進めた。さらに新しい設備への投資に注力することで、ヘリウム消費量の大幅削減への可能性に至ったと言える。」

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

出典：
“Air Products Wins Royal Philips Electronics Supplier Award”
Air Products press release (July 7, 2011)

決算

American Superconductor Corporation（2011 年 7 月 11 日）
アメリカンスーパーコンダクター社 (AMSC) は、2010 年 9 月 30 日及び 12 月 31 日締めの第 2、第 3 四半期の収支決算は事実上信憑性がないと発表した。当社は、2010 年 8 月 31 日以降に出荷した中国の顧客（Sinovel Wind Group を除く）の債務不履行があったことから、「今後、顧客からの支払いを受け取るまで、もしくは適切な支払いの目処が立つまでは収入に繰り入れるべきでない。」と決定した。さらに当社は、2010 年 9 月 30 日以降の Sinovel 社向けの出荷分に関し、現金決済を採用することを決定した。当社は、第 2、第 3 四半期決算において、支払いを受ける前の出荷受託時点における売上を計上していた。なお、2011 年第 1 四半期における Sinovel への出荷及び同社からの支払いは発生していない。現在、2010 年 9 月 30 日及び 2010 年 10 月 31 日締めの第 2、第 3 四半期決算における収支見込を下方修正し、それぞれ約 9,800 万ドルと 4,300 万ドルとなった。2011 年 3 月 31 日締めの通年収支見込に関する収入は、約 3 億 700 万ドルに減少するものと予測している。今後の決算修正申告並びに会計監査によっては、これら収支見込がさらに調整されることとなる。
出典：
“American Superconductor to Restate Financial Statements for Second and Third Quarters of Fiscal 2010”
American Superconductor Corporation press release (July 11, 2011)

エレクトロニクス

HYPRES（2011 年 7 月 7 日）
HYPRES社は、米国共通役務庁 (GSA) を経由してデジタル超電導集積回路を提供することについての認可を受けた。クロックスピード20 GHzから 30 GHzで作動するこの回路は、世界最速のデジタル回路であり、並列処理を用いない計算能力において他に類がなく、この性能は計り知れないものである。HYPRES社は、標準チップ1個当たり12,000個以上のジョセフソン接合を含んだ、高密度のニオブ系デジタル超電導集積回路を“GSA Advantage!®”として受注できる。これにより、GSAは、連邦政府機関が公共に必要な製品、サービス、設備を提供し、集中的に物資を調達できる仕組みを構築している。
出典：
“HYPRES Earns Status as GSA Vendor for Digital Superconductor ICS”
HYPRES press release (July 7, 2011)

量子計算機

National Institute of Standards and Technology（2011 年 7 月 6 日）

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

米国立標準技術研究所（NIST）の研究チームは、機械的振動を量子的な極限の大きさである“基底状態”（最低限のエネルギーレベル）まで、着実に減衰することができる技術の実証に成功した。しかもその技術は柔軟性があり、広範囲に応用可能な技術である。実験には、約 1 兆個の原子で作られた極小のアルミドラム（アルミ製の太鼓）が利用された。そのドラムは単一量子以下のエネルギーレベルである量子力学的環境に置かれると、その振動をほぼ停止させた。また、超電導回路に埋め込まれたドラム（太鼓）の動きを静めるためにマイクロ波放射の圧力を利用した。ここで使用された回路は、あらかじめドラムの振動が電磁共振器内部のマイクロ波に影響するように設計されている。その冷却方法は、「マイクロ波は共振器が自然に共振する周波数と一致するようにその周波数を変更させる。」という性質を利用している。ここで用いたドラムの Q 値は高く、そのもの自体が“量子コンピューターの一時的メモリ”として利用できるくらい長時間、個別のエネルギーパケットを蓄える（記憶しておく）ことができる。総体的に言うと、今回開発されたドラムと冷却技術は、量子計算や量子論の実証に必要な装置が作れる可能性を示唆している。研究結果は、Nature のオンライン号に掲載された。
出典：
“NIST mechanical micro-drum cooled to quantum ground state”
National Institute of Standards and Technology press release (July 6, 2011)
http://www.nist.gov/pml/quantum/drum-070611.cfm

基礎

National Institute of Standards and Technology（2011 年 7 月 7 日）
米国立標準技術研究所（NIST）の研究チームは、チップ上に集積化したチューナブル調節機能を備えた超電導回路の製作に成功した。開発された回路は、単一マイクロ波光子を異なる二つの周波数（二つの色）を重ね合わせた状態にできる。この“重ね合わせ”（量子力学の世界の基本概念）は、通常のビームスプリッターを使用し、マイクロ波を利用することにより、チップスケールで実現できた。同回路を使えば、複数の異なる量子状態を作り出し、それらを操作することが可能となる。“チップ上の光学テーブル”の試作機であると言える。この回路は、超電導量子計算の実験で使用される単一光子光源、空洞共振器、SQUID カップリングデバイスなどの部品が組み合わされたものである。当研究チームでは、SQUID の特性を調節することで、2 種類の共振周波数を結合し、単一光子が二つの異なる周波数の重ね合わせ状態の間で振動するように操作した。この様に実験条件を設定することで、光子を光学テーブル上に放出する代わりに“箱”（空洞共振器）の中に捕獲することができる。当機関の物理学者 Jose Aumentado 氏は、次のように述べている。「今回試された方法は、箱の中に捕獲された量子状態のマイクロ波を操作するという新しい方法です。この方法がいかにエキサイティングであるかという理由は、超電導体共振回路のようなチップスケールのデバイスの中で、目標とする量子状態を作り出すことがすでに技術的に可能であるという点です。そして、今、従来と同様の光学的条件設定で、こうした量子状態を操作出来るのです。」 研究成果は Nature Physics に掲載された。
出典：
“NIST prototype ‘optics table on a chip’ places microwave photon in 2 colors at once”
National Institute of Standards and Technology press release (July 7, 2011)
http://www.nist.gov/pml/optoelectronics/table-070611.cfm

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

Lawrence Berkeley National Laboratory (2011 年 7 月 14 日)

ローレンスバークレイ国立研究所（バークレイラボ）の研究チームは、コロラド州ボルダーにあるコロラド大学とアルゴンヌ国立研究所との共同研究において、特殊な酸化マンガンすなわちマンガナイトは、その電荷が集中する部分（ストライプ）を変化させることができることを発見した。このようなストライプ部分を持つ物質は相関電子物質として知られ、層状の結晶構造を持つ多くの高温超電導体が含まれる。バークレイラボの改良型放射光施設で行われている角度分解光電子分光法(ARPES)を利用して、研究チームはランタンストロンチウムマンガン系複合酸化物の中でこの驚きの新しい性質があることを証明した。温度を適切に設定すると、その温度の値によって物質はストライプを変動させたり静止させたりする。その物質が金属から絶縁体に相転移する能力を持っているからである。これは、変動二重ストライプとして知られる相である。適度にドープされた二重層のマンガンナイトが、わずか数度の温度調整によって、その電導性をオン・オフできる能力があるということは、将来的に明るい発見である。この二重のストライプ部分が 電子バルブのように作用し、そのストライプの構造を変えることによって、高温超電導体をはじめいろいろな物質を調整するのに使われる可能性が高い。 しかしながら、このような進展は、強相関物質の物理学についてより深い理解を必要とする。研究結果は Proceedings of the National Academy of Sciences で発表された。

出典：

“A manganite changes its stripes”

Lawrence Berkeley National Laboratory press release (July 14, 2011)

http://newscenter.lbl.gov/feature-stories/2011/07/14/manganite-stripes/

X 線カメラ

Science and Technology Facilities Council（2011 年 7 月 27 日）

英国科学技術施設会議 (STFC) は、毎秒 450 万フレームという数の画像を前例のない速度で記録できる画期的な X 線カメラの開発に成功したと発表した。2012 年には、このカメラはドイツの都市ハンブルグにある、現在建設中の欧州 X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設に設置される。XFEL は 2 マイルもある長い施設である。そこでは、電子を加速するために超電導加速器技術を利用している。その加速された電子は、従来の X 線源によって生成されていた X 線フラッシュよりも 10 億倍明るいものを生成することができるのである。そしてこの短く強烈なフラッシュにより、単一分子の三次元 X 線画像の取得などが可能となる。2015 年に施設が開設した際には、STFC が開発した X 線カメラを特別に設計することで、創薬やその他の重要な研究に多きな役割を果たすと考えられる。

出典：

Source: “New X-ray camera will reveal big secrets about how chemistry works”

Science and Technology Facilities Council press release (July 27, 2011)

加速器

U.S. Department of Energy（2011 年 7 月 25 日）

アメリカ合衆国エネルギー省（DOE）とインド核エネルギー省（DAE）は加速器及び粒子検出器の研究分野において、科学的発見の進捗に向けてより良い協力体制を築くため業務提携を結んだと発表した。両機関は長年にわたり、科学、技術、エンジニアリングにおいて既に培われた専門知識を

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

駆使し協力関係を築いてきた。この業務提携により、更なる研究開発活動の基盤構築ができることに期待を寄せている。とくに、この提携締結の目的は、アメリカ合衆国エネルギー省のフェルミ国立加速器研究所、トーマス･ジェファーソン国立加速器施設、ブルックヘブン国立研究所において、超電導高周波加速器技術、重イオン核物理、粒子検出器などの共同研究開発を拡大推進することにある。

出典：

Source: “US Department of Energy and India partner to advance accelerator and particle detector R&D”

U.S. Department of Energy press release (July 25, 2011)

http://energy.gov/articles/us-department-energy-and-india-partner-advance-accelerator-and-particle-detector-research

CERN（2011 年 7 月 28 日）

日欧共同実験グループアサクサ(ASACUSA)で行われた実験の中で、反陽子の質量が新しく測定され、その精度は約 10 億分の 1 であると報告された。これは陽子質量の測定精度とほぼ同等レベルだとされているが、今後の実験により、その精度はより向上するものと期待されている。もし陽子と反陽子の質量との間に違いがあるとすれば、それは新しい物理学的示唆を必要とし、物質と反物質の自然の法則に違いがあるということになる。それゆえ、このような精密な測定をすることによって、自然がなぜ反物質より物質を優先しているかということを調査する重要な機会を与えるものとなる。これらの測定を可能にするには、まず反陽子をヘリウム原子の内部に閉じ込め、その後反対方向に移動する二つのレーザー光線によって“刺激”する必要がある。そのレーザー周波数は原子内で反陽子が量子ジャンプするまで調整し、ジャンプが起こった時の周波数から反陽子の質量を算出する。なお当グループによる実験結果は Nature に掲載された。

出典：

Source: “CERN experiment weighs antimatter with unprecedented accuracy”

CERN press release (July 28, 2011)

https://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2011/PR10.11E.html

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

標準化情報 8 月のトピックス

― IEC/TC90 ad hoc 4 group* ミーティング開催 ―

産業技術総合研究所
計測フロンティア研究部門
部門長 大久保雅隆

IEC/TC90(超電導) ad hoc 4 group の第 1 回会議は、第 14 回極低温検出器国際ワークショップ初日(8/1)のプログラム終了後、18:30-21:00 に開催した。ミーティングルームで撮影した出席者 6 名の写真を下に示す。左から右に以下の順序で並んでいる。

Roberto Cristiano, CNR, イタリア（委員）
福田大治, AIST, 日本（委員）
浮辺雅宏, AIST, 日本（オブサーバー）
大久保雅隆, AIST, 日本（委員）
Chong Yonuk, KRISS, 韓国（委員）
Yong-Hamb Kim, KRISS, 韓国（委員）

図 5 IEC/TC90 アドホック 4 グループ（超電導センサー）第 1 回会議の参加者

会議では、まずラポーターの私から、IEC の活動に初めて参加する委員のために IEC/TC90 の取り組みを紹介した。次ぎに、2010 年 IEC 全体会合 TC90 ミーティング（シアトル）にて、ad hoc グループの提案を行った資料を使って、超電導センサーの IEC 標準化を検討する意義、アドホックグループの目的について説明した。

＊ 超電導センサーの IEC 標準化を検討する活動を行う。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

議論では、用語の問題として検出器のネーミングを主に取り上げた。現在研究開発されている検出器としては主に以下があるが、名前の付け方に一貫性がないことを指摘した。これは、他分野から見ると混乱の元になるため、最初に取り組まなければならない課題である。特に、以下に述べるように SSPD が問題となりそうである。

1. 動作原理に由来する検出器名
 Superconducting Quantum Interference Device (SQUID) magnetometer
 Transition Edge Sensor (TES)
 Superconducting Phase Transition (SPT) sensor
 Microwave Kinetic Inductance Detector (MKID)
2. 構造に由来する検出器名
 Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS)
 Normal-Insulator-Superconductor (NIS)
 Superconducting Tunnel Junction (STJ)
 Superconducting Strip-Line Detector (SSLD)
3. 動作原理と構造に由来する検出器名
 Metallic Magnetic Calorimeter (MMC)
4. 測定対象に由来する検出器名
 Superconducting Single Photon Detector (SSPD)
5. 構造と測定対象の両方を含んだ検出器名
 Superconducting Nanowire Single Photon Detector (SNSPD)

委員全員がネーミングに問題点があることに同意し、様々な意見が出た。議論は延び LTD の主催者が会場を閉めなければならないと督促に来た。委員から指摘された主な事項は以下の通りである。

- 半導体分野では Semiconductor sensor (detector)が一般的であるが、超電導分野では Superconducting sensor (detector)が使われる。超電導状態で使われるので、Superconducting sensor (detector)がよいと思われる。IEC の上部の用語委員会で問題となる可能性が高い。
- TES は超伝導状態と常伝導状態の中間で動作するので、厳密に言うと超伝導センサーではない。
- TES detector と言う場合もある。Detector using Transition Edge Sensor であろうが、Transition Edge Sensor Detector はスペルを書くと、Sensor と Detector が重なり適切でない。
- 検出器名として構造由来のものがよいと思われが、原理に由来する SQUID のように変更できない名前がある。この名前は広く普及している。
- MKID は M をスキップして KID と呼ばれる場合もある。
- SSPD というネーミングは、半導体分野で Single Photon Detector (SPD)が使われていることに由来する。区別するために前に Superconducting を付けた。しかし、超電導分野では TES, STJ, MMC も単一光子検出なので、ナノストリップのみを SSPD と呼ぶのはおかしい。
- SNSPD の nanowire は形状を見ると、例えば、厚み 10 nm、幅 200 nm-1 μm なのでワイヤーの形状ではなく、ストリップではないか。SSLD と SSPD を統一する名前として、構造を表す Superconducting NanoStrip Detector (SNSD)はどうか。
- 超電導センサーのネーミングとして、構造と検出対象を入れてはどうか。例えば、Superconducting NanoStrip Photon Detector (SNSPD)、Superconducting NanoStrip Molecule Detector (SNSMD)。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

- 検出器の名前を構造＋検出対象で整理してはどうか。名前は構造にして、検出器の定義を書き、その後で応用に応じて検出対象に関する情報を書いてはどうか。
- IEC 標準化に賛成する。最近ヨーロッパの超電導コミュニティーが発行した EU 超電導ロードマップを参考にして標準化を進めてはどうか(Physica C 470 (2010) 2079–2126)。
- LTD の会議や他の国際会議の機会に、IEC 標準化活動について、まず名前に関する発表を行い、多くの研究者と問題を共有してはどうか。
- Yonuk Chong 氏の専門を、SIS, Voltage standard に変更する。

今回の議論の結論として、以下で合意した。
1. 検出器名として既に広く普及しているものを除いて、検出器名は構造を基本とする。
2. 検出対象の情報は検出器名に入れるのか、それとも仕様に書くのか検討する。
3. 超電導以外の分野の検出器ネーミングや超電導に関するロードマップの記述を考慮する。
4. Working Group を設置する方向で検討する。

第 2 の会合は、オランダデンハーグで開催される超電導発見 100 周年記念会議、第 3 回は日本で開催される ISS2011 を予定している。その後、2012 年に中国で開催される IEC/TC90 会議で WG の設置を提案する予定である。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

「電子情報通信学会超伝導エレクトロニクス研究会」報告

財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所低温デバイス開発室
室長　日高睦夫

電子情報通信学会の超伝導エレクトロニクス研究専門委員会は 1982 年に設立され、30 年の歴史を持っている。同委員会では、年 4 回（1 月、4 月、7 月、10 月）研究会を開催している。今年は東北大で開催予定であった 4 月の研究会が震災の影響で中止となり、7 月 13 日に東京・機械振興会館で行われた研究会が 6 か月ぶりの開催となった。研究会の発表時間は 25 分間（5 分間の質疑込み）であり、比較的まとまった内容の講演と討論を行うことができる。

高温超伝導フィルタは、既存の誘電体フィルタに比べて低挿入損失かつ通過帯域端において急峻な遮断特性を有している。山形大と埼玉大は、直線半波長共振器に 2 つの終端開放スタブを装荷したマイクロストリップスタブ付き 3 モード共振器を開発し、UWB 無線通信仕様を満足する性能が得られた。山形大は、複数の共振器を冷凍機に実装するために共振器本体の小型化を目指した G-スパイラル共振器の設計を行った。山梨大と山形大は、フィルタ小型化の手法としてストリップライン構造を用いることを提案し、マイクロストリップライン構造と比較して約 40 %小型化できることを示した。さらに、ストリップライン構造フィルタの共振器配置による耐電力特性への影響について解析を行った。東大と国立天文台は、超伝導トンネル接合で生じるショットノイズを利用した雑音源を開発し、マイクロ波帯における低雑音冷却増幅器の高精度特性評価に適用した。

名大は、アレイ化された超伝導検出器からの出力多重化を目的として超伝導 AD 変換機の性能改善を行った。相補型デルタ AD 変換機に積分器を組み込むことで SN 比を 20 dB 改善することが期待できる。積分器内部のタイミング設計の厳密化と後段の間引きフィルタとの同期をとることで、積分器組み込み型 AD 変換機の動作を実証することができた。同じく名大は、SFQ 回路を用いた検出器多重化システムの中で 1-bit 比較器として用いる QOS (Quasi-One-Junction SQUID)の高周波特性を実験とシミュレーションにより評価した。QOS のグレーゾーンは 20 GHz で極小になり、それ以下では QOS にいくつかの動作モードが現れ、それ以上ではパルス間斥力の影響でグレーゾーン幅が広がることがわかった。京大は、フィードバックループの大きさを抑えることで高クロック動作が可能なビットスライス乗算器を提案し、k ビット・ビットスライス乗算器は、ビットシリアル乗算器と比較して k 倍のスループットと k 倍の回路規模を持つことを明らかにした。

SFQ 回路は低消費電力で知られているが、さらなる低消費電力化を目指した研究が進められている。横国大は、極限低消費電力動作を可能とする断熱型磁束量子パラメトロン（QFP）論理回路を提案した。QFP はゆっくり動作させればポテンシャルの壁を極限まで低くできるため極小のエネルギーでスイッチできる。QFP が断熱的に動作するパラメータを明らかにし、実験において NOT ゲートの動作を確認した。名大は、電源電圧を小さくすることで消費電力を低減したシフトレジスタ回路の動作実証を行った。この回路は動作速度が 20 GHz にもかかわらず消費電力は数 nW であった。そのエネルギー遅延積は従来の SFQ 回路と比べて 13 倍向上しており、CMOS 回路と比べると 5 桁優れている。横国大は、SFQ 回路に供給するバイアス電流を低減するためのカレントリサイクル技術を開発し、SFQ 回路への供給電流と帰還電流がお互いの磁場をキャンセルするよう配線を配置することにより、電流量を 1/3 に低減したカレントリサイクル回路において SFQ パルスの安定した伝達に成功した。

次回の本研究会は、10 月 12 日に機械振興会館において開催される予定である。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行
財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

第 14 回極低温検出器国際ワークショップ報告

(14th International Workshop on Low Temperature Detectors−LTD-14 , Heidelberg, Aug. 1-5, 2011)

産業技術総合研究所
計測フロンティア研究部門
部門長　大久保雅隆

1. はじめに

第 14 回の極低温検出器国際ワークショップは、8 月 1 日から 5 日間、ドイツのハイデルベルグ大学にて開催された。本会議で扱われるテーマは、低温で動作する検出器全般についてであり、その関連する分野はニュートリノ物理、暗黒物質探索、天文学、材料分析、質量分析、情報通信、核物質セキュリティー等の多岐に渡っている。この会議は、特に検出器開発にフォーカスしており、検出素子自体の作製方法・特性、読み出し回路、信号処理等検出技術全般についての発表が主である。低温検出器の最新動向を知るには最適の会議である。

議長は、金属磁気マイクロカロリメーター(Metallic Magnetic Calorimeter: MMC)の発明者である、Christian Enss 教授が務めた。彼は、元々アモルファス誘電体の低温物性が専門である。そのバックグラウンドから、数 100 ppm の Eu をドープした金の常磁性体がγ線光子を吸収したときの温度上昇による磁化の変化を、SQUID で読み出すという MMC のアイデアを思い付いた。会場付近の写真を示す。

図 1 会場付近の風景 赤い T シャツは会議スタッフの学生である。中央が議長であるハイデルベルグ大 Christian Enss 教授、右端の男性は NIST の Hilton 博士である

参加者総数は 301 名で、国別の統計は以下の通りである：米国 107、ドイツ 48、フランス 39、日本 34、イタリア 23、オランダ 18、イギリス 7、韓国 7、スペイン 5、フィンランド 4、カナダ 3、ロシア 2、オーストラリア 1、オーストリア 1、スウェーデン 1、ポルトガル 1。日本は、第 4 位の参加者数であった。日本以外での開催では日本からの参加者数は増加傾向にある。因みに、2005 年に日本で開催したときには、米国 69、日本 63、フランス 24、イタリア 16、ドイツ 16、その他の計 225 名であった。米国からの参加者は常にトップであるが、2 位の国は開催国になる。その後の会議（フランス、アメリカ）の参加者数は、293 名、269 名であったが、今回初めて 300 名を越えた。これは、従来のニュートリノ物理や暗黒物質探索に加えて、放射光での X 線分析、質量分析、量子情報通信、核物質管理、テラヘルツ検査といった応用分野が広がってきたことに対応していると思われる。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

2. チュートリアルとセッション構成

今回の会議は、恒例となってきているチュートリアルで開始され、スタンフォード大の B. Cabrera が"Cryogenic Particle Detectors" と題した LTD の概要を、主に新しい学生向けに紹介した。もう一つのチュートリアルは、米国 Tulane 大の A. Burin の "Non-equilibrium slow dynamics at low temperature in amorphous solids"であった。アモルファス材料の低温における電場や張力印加にともなう誘電率変化の緩和現象についての紹介であった。放射線吸収体としての応用はあるかもしれないが、LTD とは直接は関係がなかったので不思議に思っていたが、後述するように翌週北京で開催された LT26 で再び Enss 教授に会い、元々の専門がアモルファス材料の低温物性であることを知って納得した。

16 件の招待講演、43 件の口頭発表は以下の 14 のセッションに分けられていた。全員が参加する口頭発表とポスターセッションというシンプルな構成が伝統である。ポスター発表は、192 件であった。1 つのセッションを除いて、それぞれのセッションの最初に招待講演が 1 件割り当てられており、講演者とタイトルは以下の通りで

1. 転移端センサーの物理と理論：J. Sadleir(NASA) 転移端センサーの物理と理論モデル
2. 転移端センサー開発、製作、テストと応用：J. Ullom(NIST) 転移端センサーの基本原理と応用
3. 微細加工、極低温技術、その他の技術：G. Hilton(NIST) 極低温検出器の作製技術
4. 新規な検出技術：L. Gastaldo(ハイデルベルグ大) 磁場侵入温度計によるマイクロカロリメーター
5. 多重化、SQUID、読み出し、解析：J. Beyer(PTB) 転移端センサーの SQUID 読み出し
6. 磁気カロリメーター：S. Bandler(NASA) 磁気結合マイクロカロリメーター
7. 粒子吸収体とアンテナ - 物理とデザイン考察：A. Kozerezov(ランカスター大学) 金属吸収体におけるエネルギー変換と熱化
8. ニュートリノ質量実験：A. Giuliani(CNRS) 極低温によるニュートリノ物理
9. 力学インダクタンス検出器：J. Baselmans(SRON) 力学インダクタンス検出器
10. 原子物理、原子核物理、宇宙物理,その他の分野における X 線とγ線
    F. S. Porter(NASA) 極低温検出器を使った X 線分光学
11. 天文学とテラヘルツ応用におけるミリ/サブミリ波ボロメータ
    M. Sauvage(CEA) 赤外天文学の最近の進歩 —ハーシェルとプランクの時代—
12. IR から UV 領域の単一光子検出：福田大治(産総研) 量子情報のための Ti ベース転移端センサー
13. 暗黒物質探索：P. Brink(SLAC) 暗黒物質直接検出実験の展望
14. α線とβ線分光、計測学、質量分析、重イオン、中性子：招待講演なし

ここで、転移端センサーは Transition Edge Sensor (TES)、SQUID は超電導量子干渉計(Superconducting Quantum Interference Device)である。所属は一般的と思われる略号で示した。

3.主な発表

招待講演と口頭発表の中からいくつかを簡単に紹介する。報告者の興味に偏ることをお許し頂きたい。

NIST の Ullom は TES の基本的動作と応用について概観した。応用は、サブミリ波からγ線に渡る電磁波の検出、暗黒物質探索、核物質の分析に広がっていると報告した。

NIST の Hilton は、半導体のムーアの法則（半導体集積回路の密度が 1.5 年毎に倍になる）に擬えて、極低温検出器の素子数の増加についてまとめた。LTD-1(1987)のころの単一ピクセルから、2011 年では数 10 キロピクセルに向上しており、ほぼムーアの法則に沿っていると見ることもできる。このまま向上すると 2030 年頃にはメガピクセルの超電導検出器アレイが予想されるが、ムーアの法則のような向上は今後期待できない。それは、使用している材料の違いや、素子構造、素子当た

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

りの有感面積を大きくする必要があるといた要因があるからである。応用によっては単純に素子数のみで語ることはできないが、作製技術に対する成熟度の指標になる。数 10 キロピクセルは SCUBA-2 といったゆっくり変化する天体観測用に開発されたもので、高計数率が要求される X 線分析や質量分析では、数 10 から数 100 ピクセルが研究開発されている。

ランカスター大の A. Kozorezov は放射線検出器に必ず必要な吸収体について、常伝導金属や超電導体にエネルギーが吸収されたときの熱化やエネルギー緩和について理論的考察を行った。また、TES を超電導弱結合と横方向の長距離近接効果で表し、一般的な二流体モデルに対して、抵抗でシャントされた接合モデルを提案した。TES のノイズのバイアス点依存性を説明できそうだとのことであった。

産総研の福田は、100 -200 ns の高速動作が可能な通信波長域用の TES について報告した。TES は通常ミリ秒の緩和時間であるが、反射防止多層膜と反射膜の中間に Ti 製の TES を埋め込んで、量子情報用に重要となる 98 %以上の検出効率と数 100 ns の緩和という高速動作を実現した。現在世界最高速の TES である。

口頭発表に採択された日本の一般論文は、以下の 4 つであった。

1. 関谷(ISAS/JAXA)ら：誘電体 X 線マイクロカロリメーターの開発
2. 下田(埼玉大学)ら：ASTRO-H に搭載する X 線カロリメーターのデジタル信号処理
3. 浮辺(産総研)ら：X 線吸収微細構造(XAFS)測定用の 100 素子超電導トンネル接合アレイ検出器の性能
4. 大久保(産総研)ら：質量分析の基本的限界を克服する超電導検出器

関谷らは、X 線吸収体として極低温における誘電率の変化を利用した新しい X 線検出器を提案した。下田らは、日本の X 線天文衛星 ASTRO-H 向けの信号処理技術について報告した。浮辺らは、放射光における XAFS 向けに、エネルギー分解能最高 11 eV, 光子計数率 1 Mcps の 100 素子 STJ アレイ X 線分光装置の現状について報告し、現在放射光ビームラインでユーザーに公開していることをアナウンスした。大久保らは、高エネルギー分解能に加えて、もう一つの特徴である超高速応答に注目した。高速の超電導検出器として、STJ と超電導ナノストリップ検出器がある。マイクロ秒からナノ秒の高速応答が要求される質量分析に応用し、質量分析が直接質量を測定できないという原理的限界を克服できることを示した。また、1 ns の応答速度をもつナノストリップ検出器の分子検出原理が、ホットスポットモデルで説明できることを示した。招待講演と口頭発表が行われた会場の様子を以下に示す。

図 2　口頭発表会場の風景（動画）

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

ポスター発表で印象深かったものを 2 つ上げる。スウェーデンのルンド大 Jens Uhlig は、テーブルトップの時間分解 XAFS 分光装置について発表した(NIST、フィンランドのユバスキュラ大との共同研究)。レーザーを大気中で水のジェットに放射し、発生するほぼ白色のサブピコ秒制動 X 線パルスを使って、ポンププローブによる分子構造ダイナミクス解析を可能にした。試料を透過した X 線をエネルギー分解能 3 eV の 40 素子 TES アレイで検出して、プローブ X 線のエネルギーを走査することなく XAFS スペクトルを測定可能にした。励起プローブと測定のためのプローブの時間差を調整することにより、時間分解の XAFS データを得ることができる。1 秒間に 100 光子という低いカウント率の TES ではあるが、先週金曜日の最新の測定では、数時間でデータ取得が可能であったとのことであった。下図は、ポスターセッションの風景である。

イタリア CNR の Roberto Cristiano のグループは、1 ns の時間分解能が要求される質量分析のための分子検出において、前回の会議で 200 μm 角の素子において 700 ps のパルス幅を報告している。今回は 50 nm 厚 800 nm 幅の NbN ナノストリップ検出器において、2 mm 角と 100 倍の素子面積にしたにも関わらず、約 2 ns のパルス幅を実現し、時間分解能を大きく低下させることなく有感面積の大幅な改善を達成した。広い有感面積にナノストリップを配置すると 1 mm の素子サイズでもナノストリップの長さは 1 m となり、力学インダクタンスによって決まる応答時間は遅くなる。この問題を、ナノストリップの並列配置により解決した。

図 3　ポスターセッションの様子

4. 展示

11 社の展示があった。特に、米国の Star cryoelectronics 社が TES と STJ の X 線分析装置を製品として販売するとしてデモンストレーションしていた。会場では、インターネット経由で米国の装置が測定している X 線スペクトルデータが、リアルタイムで表示されていた。すでに顧客が付いているとのことであった。社長の R. Cantor とデモンストレーション画面を下図に示す。背景には、クライオスタットの写真が見える。

図 4 Star cryoelectronics 社の展示。社長の Robin Cantor と米国に設置されている装置で測定している X 線スペクトルのリアルタイム表示。

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

5. まとめ

LTD-14 では、100 件を超える数のポスターが TES に関するものであったことから、TES 検出器が低温検出器の主流となっていることが感じられた。ただ、TES 検出器のエネルギー分解能の理論値からのズレについての解析は進んでいるものの、6 keV の X 線光子に対するエネルギー分解能の向上は止まっている（1.58 eV）。多くの応用はこのエネルギー分解能で十分であり、いくつかの分野で低い光子計数率が問題となってきている。現在は計数率が問題とならないサイエンス分野に応用されており、1000 素子を超えるような大規模アレイが開発されて来ている。そのための素子の特性評価、読み出し回路技術等の実装についての発表が増えている。ナノ材料分析といった分析機器としての応用も試みられており、放射光やテーブルトップの XAFS 測定を目指した発表があった。TES のエネルギー分解能は十分であるが、1 素子当たり 100 cps という低い計数が克服しなければならない問題となる。

一方、高エネルギー分解能以外に超電導がもっている、超高速性に注目した研究開発も注目される。前回 LTD のサマリートークでもこの視点が取り上げられ、今回の会議では、超伝導ナノストリップ検出器の発表が増加した。通信波長域の単一光子検出から単一分子検出に関して、カールスルーエ研究所から 4 件、産総研から 1 件、イタリア CNR から 1 件、ウィーン大学から 1 件の計 7 件と前回の 2 件から増加した。新しい流れとして注目される。また、10^6 cps といった高い光子計数率が要求される放射光計測用に開発された、100 素子アレイ STJ 分光器 XAFS 測定装置が日本でユーザーに公開される段階になったことは、多くの参加者から実用段階になったとして賞賛の言葉があった。米国の Star cryoelectronics 社が、STJ と TES の SEM 搭載 X 線分析装置を市販することがアナウンスされた。機器展示において、インターネット経由で米国の装置が測定している X 線スペクトルをリアルタイムで表示していた。

LTD-14 の翌週に北京で開催された第 26 回低温物理国際会議（26th International Conference on Low Temperature Physics）には、LTD のコミュニティーから C. Enss 教授(ハイデルベルグ大)、J. Ullom(NIST)、Maasilta 教授(Jyvaskyla 大学)と大久保(産総研)の 4 名が招待講演となっており、北京の会場で再会した。超電導センサーは、検出器自体の研究開発に加えて様々な応用へ展開され始めており実用域に到達しているものもある。このことが他の会議でも認められつつあると言える。

次回の LTD は、2013 年にカリフォルニア工科大学にて開催される。その後の開催予定は、現在のところ、2015 年グルノーブル、2017 年日本、2019 年ミラノという予定になっている。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

【隔月連載記事】

イットリウム系超電導線材の開発の道のり（その 5）
～ コストダウンの壁と事業化への挑戦 2008 年－2011 年 ～

株式会社フジクラ
超電導プロジェクト室
グループ長 飯島康裕

90 年代後半に米国において Y 系線材が超電導技術開発の中心に位置づけられた際、決め手となったのは銀を多用する Bi 系よりも原料コストが小さく原理的に将来低価格が見込める点であったと言われている。もちろん、Y 系がより高い温度で磁界中高性能が見込める点は応用上注目される特長ではあるが、高温超電導の応用展開にあたって障害になっているのはむしろ価格だという認識があった。その後立ち上がった日米の大規模プロジェクトによって長尺化の壁が乗り越えられたが、その段階でもなお Y 系線材は歩留まりが悪く、加工コストが非常に大きく、明らかに割高であった。しかしながら、各種の低コスト化技術が進展するとともに、ここ数年の線材性能並びに歩留まり改善技術が大幅に進み、ごく最近ようやく Bi 系を猛追する段階に進んできた。

前述したように、プロセス低コスト化研究については米国の進捗が早く、低コストの配向基板として RABiTS 基板並びに MgO-IBAD 法中間層基板が相次いで開発されていったが、量産 IBAD 設備の技術蓄積については寧ろ日本側が先行していたため、後者については比較的早くキャッチアップすることが出来た。弊社においては 2005 年頃から MgO 方式の取り組みを始め、2008 年度には大型 IBAD 設備を用いて 1000 m 級の中間層を 1000 m/h の速度で試作することに成功し、現在では全面的に切り替えられている。RABiTS 法についても、米国で進んだ添加元素方式ではなく、配向金属テープをステンレス等とクラッドさせる方法によって高強度の基板を構成する手法が最近になって鹿児島大学、住友電工等で開発された。これらの技術により、超電導層を成膜する土台となる配向基板テープについては、極めて低コストで大規模に量産出来る体制が日米でほぼ出来上がっている。

超電導層の成膜方法についても、原理的に最も低コストとされる TFA-MOD 法（低温焼成可能な塗布熱分解法）が米国で先に開発され、現在では AMSC 社により同方式による線材が大規模生産されるに至っており、近年米国の他、欧州や中国、韓国の電力ケーブルプロジェクト向け線材として採用されつつある模様である。同法は国内においても ISTEC と昭和電線により量産性に優れるバッチ熱処理方式が開発されている。他方、気相プロセスである PLD 法や CVD 法についても、近年の改良開発によってランニングコスト、及び製造歩留まりが大きく改善した。こちらも量産投資については米国 Super-Power 社の CVD 法が先行し、2008 年にニューヨーク州アルバニーの電力ケーブルプラントの一部に、初の Y 系導体として採用された。PLD 法についてはエキシマレーザ発振器の性能向上及び加熱チャンバーの改良等によって近年著しく生産性が向上した結果、同法による線材の市販が 2009 年にフジクラから開始されている。

このように、Y 系線材はほぼ同じ構造でありながら複数の異なる方法で製造されており、この点は一貫して 1 種の製法で作製されている Bi 系と好対照をなしている。この 10 年で明らかに不利なプロセスは淘汰され、かなり整理されているものの、依然として異なる製法が並存し続けているのは、コストダウンに向けてのコンセプトに違いがあったためである。即ち、①原理的に最も低価格なプロセスを選択し、性能と歩留まりの向上に挑戦する考え方、②性能と歩留まりが確認できるプロセスを選択し、コストダウンを並行して進める考え方、の 2 種である。前者の立場の代表例が、

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

気相プロセスを避けて RABiTS 基板上に TFA-MOD 法を採用したグループ（米 AMSC、独 Zenergy 等）である。後者の代表例は IBAD 法基板上において PLD 法、CVD 法超電導層を採用したグループ（米 SuperPower、フジクラ、独 Bruker 等）である。中間的な立場として、IBAD 法基板上に TFA-MOD 法、多元熱蒸着法（レーザ発振器も MO 原料も用いない低コスト真空プロセスとされる）による超電導層を採用したグループ（昭和電線、韓国 SuNAM 等）もある。市販が開始された頃の Y 系線材はどの製法を用いてもロット間で長手方向の均一性を維持するのが難しく、歩留まりが低いので高価とせざるを得なかった。この点の改善がなければ原理的なコストダウンは絵に描いた餅になってしまうので、一筋縄ではいかなかったのである。筆者は上記②のコンセプトで開発を続けてきた立場であり、全てのプロセスについて充分な記述は不可能なため、以下は PLD 法の性能向上と歩留まり改善について述べる。

PLD 法は多元系酸化物膜の形成に最適な製法として、早くから Y 系線材プロセスとして採用されたものであるが、前述したようにビームスキャン技術によって大面積成膜が可能となってからは原料収率が 50 %を超え、製造線速も大幅に向上した。さらに最近の技術進展として、歩留まりと均一性向上、厚膜線材の実現に寄与した Hot-Wall 式加熱成膜チャンバーの成功が挙げられる。この加熱方法は 2000 年頃に独ゲッチンゲン大学から提案された High-Rate-PLD と称する方法にヒントを得たものである。基板の温度の安定性を極限まで追及するために、彼らはドラム状のホルダーに一定長の線材を巻きつけ、密閉された加熱空間において回転するドラムを安定加熱しつつ、同空間内に置かれた超電導ターゲットに僅かな隙間を通してレーザー光を照射し成膜する方法を採用していた。この方法は一定の長さの線材しか作れないのが欠点であったが、均一な厚膜を成膜出来たことから一時期最も性能の良い線材を報告していた。ここで使われていたドラムホルダーをフリーロールに変え、成膜空間を出来るだけ密閉した上で、長尺の線材を連続的に生産可能にしたものが Hot-wall 式加熱チャンバーである。本方式により、10 mm 幅線材として初めて 1 kA を超える I_c を達成（77 K,0 T）したほか、ロット間でほとんど変動なく均一性の高い線材を安定して作製可能となり、歩留まりが大幅に向上した。この結果工業的なイメージでの生産体制が可能となって、将来コストの見積もりが行えるようになった。また線材性能の目安である I_c x L において 800 m 級で 500 A を超え 46 万 Am(77 K, 0T)を超える世界記録を達成することが出来た。2 年前に達成された 15 万 Am クラスについては、現在では市販可能なレベルに到達しつつある。

さらに PLD 法にとって追い風となったのは、エキシマレーザー発振器がこの 10 数年で長足の進歩を遂げたことが挙げられる。これには液晶ディスプレイ（LCD）業界において、大面積ガラス基板上のポリシリコン膜のアニール工程に PLD 向けと同種のエキシマレーザーが使われていることが大きく影響している。巨額市場の要請があると技術は急速に進歩するもので、同じような初期投資コストで、より高性能でありながら維持管理コストが年を追うごとに低減していった。現在では従来考えられない価格で大型の液晶テレビが売られるようになったが、これには上記レーザーの高性能化・維持コスト低減も寄与しているものと思われる。

これらの結果、米国で先行した化学的方法に比べてやや遅れたものの、PLD 法についても量産投資を検討し得る段階に到達しつつある。2011 年現在の販売価格はいずれの方法でも概ね 20-30 円/Am 程度に到達しており、窒素温度自己磁界の性能比において Bi 系線材の約 2 倍程度となっている模様である。今後も価格の低減は進行する見込みで、PLD 法の場合で 2015 年断面にて 5-6 円/Am 程度に到達するものと期待されている。また需要次第であるが、将来においては 2-3 円/Am 程度に到達する可能性もあり、各社それぞれの方法で努力を続けているものと思われる。

以上、事業化へ向けてようやく Bi 系と同じ土俵に立ちつつある Y 系線材の現状について述べた。Bi 系との価格競争が今後どのようになっていくかは双方の努力次第であるが、一方 Y 系には Bi 系には難しい新しい市場開拓という使命もある。次回は、液体窒素温度付近までの磁界中の高性能化

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

を目指した人工ピン技術、高強度を要請される強磁場応用、細幅線、スクライブ線の開発による低損失化等、Y 系ならではの技術進展について述べる。

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.

超電導 Web21
Superconductivity
超電導 Web21
2011 年 9 月 1 日発行

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

読者の広場

Q&A

Q :「275 キロボルトに耐えられる世界最高電圧の超電導（線）ケーブルを開発したという新聞記事がありましたが、どういう技術により可能になったのでしょうか。また、どういう応用が期待されるでしょうか?」

A: 世界で開発されている超電導ケーブルとしては、超電導の高密度大電流通電の特性を利用してケーブルシステムをコンパクトにして都市部導入部分に適用する中高電圧電力ケーブルと、今回開発した超高電圧電力ケーブルの 2 種類があります。前者は、東京電力ー住友電工の実証試験プロジェクトに代表される 66 kV 超電導ケーブル、韓国の 23 kV 超電導ケーブル、米国 AEP の 24 kV 超電導ケーブルがあります。一方で、系統送電線として超高電圧で大容量送電を目指した開発もあり、米国の LIPA プロジェクトでは 135 kV/2.4 kA 超電導ケーブル、韓国の DAPAS プロジェクトでは 154 kV/1 GVA 超電導ケーブルの開発が進められています。日本国内の電力系統は、発電所から都市近郊までは 275 kV～500 kV の超高圧架空送電線が主に使われ、都市部近郊から都市内部へは地中に布設された 275 kV 級地中送電ケーブルが用いられています。その後、電力系統は、トランスで電圧が降下され、分岐されながら需要家に配分されていきます。今回新聞発表された NEDO の「イットリウム系超電導電力機器開発」プロジェクトの中で開発を進めている 275 kV 超電導ケーブルは、系統の中でも上位に位置する基幹系統への導入を考えて開発されています。
さて、275 kV 超電導ケーブルは、これまでにない高電圧に耐える必要があり、その電気絶縁が開発の重要ポイントになります。また、電圧にほぼ比例して電気絶縁も厚くなりますが、材料自身の熱伝導が悪い電気絶縁材料を用いるために、導体の損失が大きいと導体の発熱量も大きくなり超電導を維持できなくなる可能性もあります。そのため、通電損失を小さくすることが要求されます。

電気絶縁については信頼性が重要であり、長期において絶縁破壊のない材料選定がポイントとなります。古河電工では、いくつかの電気絶縁材料の候補を選び、超電導ケーブルモデルを作製し、交流電圧破壊試験やインパルス破壊試験を実施してそれぞれの破壊電圧の許容値を求めました。また、破壊に至らない低い電圧でも絶縁体中で局所的に発生する放電（部分放電）が絶縁材の劣化を引き起こすと考えられていることから、部分放電発生電界の測定を行いました。また、部分放電発生直前の部分放電が発生しない電圧を長時間かけ続け、部分放電が発生する時間を測定する長期特性の調査を行いました。これらのデータを基に長期安定な設計電界を決定し、275 kV 超電導ケーブルの絶縁設計を行い、運転電圧の 2.5 倍の交流電圧、そして系統の最大インパルス電圧の 1.1 倍のインパルス電圧に超電導ケーブルが耐えることを確認しました。

超電導ケーブル導体の損失には、課電することによる絶縁体中の誘電損失と、通電による超電導導体内のヒステリシス損失があります。誘電損失低減には、絶縁体の電気特性を決定する誘電率（ε）と誘電正接（$\tan\delta$）を耐電圧性能と合わせて考慮し、ポリプロピレンフィルムの比率の高いクラフト紙とポリプロピレンフィルムのラミネート紙（PPL 紙）を最適材料として選択しました。その結果、0.6 W/m の低い誘電損失を達成することができました。一方、超電導導体内のヒステリシス損失に関しては、3 mm 幅の狭幅線材を、フォーマ上にギャップを小さくして巻きつける方法で低損失化を図っています。今回は、5 mm 幅の線材から臨界電流の低い線材端部を切断して幅方向の臨界電流密度を均一にした 3 mm 幅線材を用いたことで、これまでの超電導導体における交流損失の

© ISTEC 2011 All rights reserved.

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-5717

50 %となる 0.12 W/m at 3 kA を実現することができました。

超電導機器は冷却しなければなりませんが、一般の超電導機器は容量が大きいほど冷却で必要とされる動力の割合が小さくなり効率が良くなっていきます。275 kV 超電導ケーブルは、試算によると現用の CV ケーブルに比べて、同じ送電容量の電力（1.5 GW）を送る場合には、送電損失を 4 分の 1 以下に低減することが可能となり、二酸化炭素（CO_2）排出量の削減にもつながると期待しています。

回答者：古河電気工業株式会社パワー＆システム研究所 超電導応用開発部部長 向山晋一 様

超電導 Web21 トップページ

© ISTEC 2011 All rights reserved.