

「低炭素化社会のための
超伝導直流送配電システムの研究開発」

平成 23 年度～平成 27 年度
文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
研究成果報告書

平成 28 年 3 月

学校法人名 学校法人 中部大学

大学名 中部大学

研究組織名 超伝導・持続可能エネルギー研究センター

研究代表者 山口 作太郎

本報告書は、文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の補助金により、学校法人中部大学が平成 23 年度から平成 27 年度に事業として行った「低炭素化社会のための超伝導直流送電システムの研究開発」に関する成果をまとめたものです。

従って、本報告書の著作権は、文部科学省に帰属しており、本報告書の全部または一部の無断複製等の行為は、法律で定められた場合を除き、著作権の侵害に当たるので、これらの利用行為を行うときは、文部科学省の承認手続きが必要です。

はじめに

本プロジェクトのきっかけは、平成 20 年 8 月に藤原洋氏より中部大学に超伝導直流送電を行うために 4 億円を越す寄付があり、それによって溝内に 200m ケーブル実験装置(CASER-2)が建設され、平成 22 年 3 月に完成したことである。平成 22 年中に CASER-2 は 2 回の冷却・通電。昇温試験を順調に行い、データ収集に努めた。そして、長距離化のために、引き続き CASER-2 を利用した研究開発を続けるため、私立大学戦略的研究基盤事業に応募し採択された。研究期間は平成 23 年度から平成 28 年 3 月までであった。この応募申請時期から本年度に終了するまでには、平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災とそれに伴う津波、東京電力福島第一原発事故によるすべての原子力発電の停止、化石燃料の輸入の増加による日本の貿易収支の赤字幅の拡大、電気量の値上げによる家計や各種産業の負担の増大など社会・経済的な事件・事象が複数同時並行的に生じ、日本社会を一変させた。この異変は本研究遂行にも強く影響を与えた。

また、同時に複数の研究開発プロジェクトが本研究と並行して進められた。主なプロジェクトを以下に示す。

- 1) サハラ・ソーラーブリーダー計画(SSB)
- 2) FUPET による SiC 半導体素子開発
- 3) JST A-STEP ハイリスクによる超伝導ケーブル布設方法の開発
- 4) 経産省・石狩プロジェクト (500m, 1000m の直流ケーブル・プロジェクト)

以下、簡単に紹介する。SSB はサハラ砂漠の砂(SiO₂)を還元して高純度シリコンを得て、これから太陽電池を作り、再度砂漠に導入し、その電力を活用するプロジェクトである。この活動を通じて産油国の新しい国家建設プロジェクトを提案してきた。FUPET は次世代半導体材料である SiC から半導体素子、電力変換器を開発する国家プロジェクトであり、中部大は SiC インゴットの放電加工のテーマで加わった。直流送電では大型電力変換器が必要になるからである。A-STEP は長尺の超伝導ケーブルの熱収縮問題を解決するために、住友電工殿と共同で JST 資金を得て開発を進めた。此の成果がなかったら石狩プロジェクトは完成しなかったであろう。そして、経産省の石狩プロジェクトである。これは現時点での到達点であり、その意味で本プロジェクトの出口でもある。石狩プロジェクトで建設された現時点でケーブルは世界一長く、低損失を実現した超伝導ケーブルである。このため、多くの有用なデータが現在得られつつある状況である。以上のように、これらの研究プロジェクトは互いに関連すると同時に、本プロジェクトと密接な関係を持ちつつ進められた。逆に、本プロジェクトが実施されたことによって、複数プロジェクトを順調に進めることができたと言って良い。これは文部科学省が本事業を進める上で本来求めていることであり、理想的に進めることができたと考えている。例えば、石狩プロジェクトのための基礎的な実験や個別開発は本プロジェクトで建設した機器を多用した。このように順調に進めることができたのは、関係者各位の協力及び努力と尽力の結果と考えている。ここで改めてお礼を申し上げたい。

311 震災以降の状況のなか、2014 年 4 月 11 日に閣議決定された第四次エネルギー基本計画では、電力システム改革を始めとした国内の制度改革が進展するとともに、北米からの LNG 調達など国

際的なエネルギー供給構造の変化が我が国に具体的に及んでくる時期（2018年～2020年を目途）までを、安定的なエネルギー需給構造を確立するための集中改革実施期間と位置付け、安全性（Safety）を前提とした上で、エネルギーの安定供給（Energy Security）、経済効率性の向上（Economic Efficiency）、環境への適合（Environment）をキーワードに、最大限の取組を行うことを要諦としている。

なかでも太陽・風力等の再生可能エネルギーは温室効果ガスを排出せず、純国産であるため、エネルギー安全保障にも寄与できることから、将来のエネルギー源として期待されている。そして、311震災以降、特に世界的にも再生可能エネルギー技術の進展が見られ、米国・カルフォルニアでは、シェールガス革命によって安価になった天然ガスを用いた火力発電所よりも安価な電力を太陽光発電所から得られるようになってきた。したがって、研究開発の主流はコスト低減から季節・時間変動の大きい再生可能エネルギーを有効活用し、安定供給する課題に移りつつある。この安定したエネルギー供給を行うためには、相互に電力のやり取りができる広域電力網の整備が必要不可欠とされ、低損失を実現した超伝導送電が期待をより多く集めるようになってきている。そのために送電に伴うエネルギー損失が低いことの実証が強く早急に求められている。これは、長距離送電だけでなく、電力の安定供給には送電網を複数回通るためである。その研究開発は人材の育成も含めて、国際的な協力のもとに進めて行く必要があると考えている。

以下、本報告書は主に中部大学で実施した研究開発を中心に記載した。本プロジェクトでは、超伝導直流送配電システムの小規模応用の基盤技術の研究開発を行い、大規模太陽電池のモデル系を組み合わせるための電力システムの研究開発を行った。現在までには、ケーブル冷却・安定循環等の超伝導システム設計・運用にかかわる研究開発（平成24年度）、長距離送電を目指した熱侵入低減および循環システムの改良による冷媒流量の増大、臨界電流向上等の開発及び原理検証（平成25年度）を行い、4年目には改良した循環システムの性能試験（全体試験）、通電試験、偏流効果のシミュレーション、ペルチェ電流リード性能評価結果解析法の開発等の研究開発を行った。また、20kWの太陽電池パネルを導入し、これを超伝導システムに接続するための電力変換器については開発を継続している。

また、本年度に入り超伝導バスバーを利用した航空機応用も JAXA との共同研究が始まった。本報告書でも一部紹介しているが、これは幾つかの研究プロジェクトの成果とも考えている。

以上の研究により、超伝導直流送電技術の技術的問題点を洗い出し、解決することにより、社会に導入可能な超伝導直流送電システムのプロトタイプを提示し、今世紀の重要な問題の一つであるエネルギー利用技術を向上させ低炭素社会の基盤技術を研究開発することで、世界に広く貢献することを目指している。

平成28年3月

中部大学 超伝導・持続可能エネルギー研究センター長
山口 作太郎

謝辞

本事業の推進にわたり、多大なるサポートしていただいている文部科学省にまず御礼を述べたい。同時に、研究基盤形成として文科省と共に研究をサポートしていただいている学校法人中部大学にも合わせて多謝する次第である。

研究開発は拠点となるべく中部大学で推進されているが、国内外の産官学の研究者の協力のもと進められている。その協力無しには開発項目が多岐にわたる超伝導送配電システムの研究開発の基盤形成は遅々として進まなかったことと思われる。ここに、その名前を挙げさせていただき感謝の意を表する次第である。

(以下敬称略)

アイシン精機(株)	近藤 斎・大橋義正・山田佳史・野町博康
アラブ経済研究所	北村陽慈郎
イーグル工業(株)	上村 訓右・大久保 夏夫・森 浩一・ 高田 寛・西田 真司・増永 大樹
A B B (株)	新岡 卓・マックスゴールドイー・ 長田雅史・Jochen Kreusel
(株)エイト・エンジニアリング	八江正信
エクセルオブメカトロニクス(株)	金澤恒雄
NTN (株)	日吉 博昭・山田 裕之
NTTデータ先端技術(株)	三宅 功・村 文夫・羽田正二
河村電器産業(株)	中島 仁
京セラ(株)	正田博之
(株)クリハラント	嶋田雅景・池上 仁・久米弘一
さくらインターネット(株)	田中邦裕・澤村 徹
(株)サンテクノ	森 照雄
J F E スチール(株)	日下修一・横川 浩・石黒康英
(株)ジェック東理社	牛島 勇・青木五男・金子充宏・石井嘉人
シャープ(株)	村松哲郎・小津創太
昭和電線ケーブルシステム(株)	長谷川隆代・箕輪昌啓
SUMCOテクノロジー(株)	橋本眞幸・森田悦郎
住友スリーエム(株)	外山成仁

住友電気工業(株)	佐藤謙一・林 和彦・広田博史
住友電設(株)	阿部洋一・野村尚之
千代田化工建設(株)	腰塚博美・大石前次・石山功太郎
帝人(株)	栗野 透・滋野治雄
(株)東芝	高木喜久雄・吉岡正純・上原京一・川野寛正
(株)トーエネック	西戸雄輝
(株)ナガセインテグレックス	野口典孝
名古屋興酸(株)	石川克彦
(株)ナノオプトニクス・エナジー	藤原 洋
日新電機(株)	萩原義也
日本軽金属工業(株)	岸本篤始
日本経済新聞社	黒川 卓
(社)日本電気協会	森 信昭
パナソニック (株)	上田大助・田中毅
(株)パワーユニテッド	小橋康浩
(株)日立製作所	浅野克彦・小島啓二・加藤修治・田中和英
(株)ビンワード	山路達也
(株)フェローテック	折原大輔・篠原良明・田鎖克教・羯磨賢一・倉八伸行
(株)フジクラ	平田一樹・齊藤 隆
古河電気工業(株)	八木正史・向山晋一
(株)前川製作所	川村邦明・町田明登・山本恵一・仲村直子
(有)マサキ	有満辰夫
みずほ情報総研(株)	小野耕平・石原範之
三井物産(株)	鈴木啓之
(株)三菱総合研究所	神津 明・小西康哉
(独)産業技術総合研究所	奥村 元・加藤智久
(社)新金属協会	織山 純
核融合科学研究所 (NIFS)	小森彰夫・相良明男・今川信作・下妻 隆・柳 長明・江本雅彦
国立情報学研究所	上野晴樹

(財) 科学技術交流財団	古川寿三枝
太陽光発電技術研究組合	桑野幸徳
青山学院大学	下山淳一
九州工業大学	松下照男・小田部荘司
大同大学	武田秀雄
玉川大学	宮田成紀
福岡工業大学	倪 宝栄
北海道大学	三澤弘明・小田 研・浅野泰寛・河村公隆
明治大学	野村新一
龍谷大学	福山泰子
筑波大学	中嶋光敏・磯田博子
弘前大学	古屋泰文・伊高健治
物質・材料研究機構	北口 仁・熊倉浩明・松本明善・角谷正友
高エネルギー加速器研究機構	細山謙二
マサチューセッツ工科大 (MIT)	Bruno Coppi ・ Joseph Minervini ・ Linda Sugiyama ・ Makoto Takayasu ・ Leslie Bromberg
University of Sciences and Technology of Oran (USTO)	Amine Stambouli ・ Flazi Samir ・ Sultana Daud
欧州原子核研究機構 (CERN)	Amalia Ballarino
サステイナビリティ研究所 (IASS)	Carlo Rubbia ・ Adela Marian
米国電力研究所 (EPRI)	Steven Eckroad
W2AGZ technologies (米国)	Paul Grant
中国科学院電工研究所 (IEE/CAS)	Xiao Liye
カルコフ国立大学 (ウクライナ)	Oleg Shyshkin
University of Western Sydney	Tosin Famakinwa
University of Tunis El Manar	Samia Charfi Kaddour
Tunisia Republic	Salah Hannachi
Columbus Superconductors	Giovanni Grasso
Russian Cable Scientific Research and Development Institute	Vitaly Vysotsky

以上、多くの方々を挙げさせていただいたが、これらはほんの一部であり、今年度に議論等で多くの時間を割いていただいた方に限っている。お名前を述べられなかった方々にはお詫び申し上げたいが、これも、幅広い分野が関連する本事業の特色であり、その拠点となるべく切磋琢磨していく所存であるのでご容赦願うとともに、すべての方々に今後とも変わらぬご指導をいただけるようお願いするところである。

なかでも、故北澤宏一先生には本プロジェクトの評価委員長として、多大なるご指導をいただいた。長年のご指導と、また、超伝導分野の発展に尽くされた先生の御功績に対し、尊敬と感謝の意を表すると共に、心からのご冥福をお祈り申し上げます。

そして、最後に中部大学内の方々にもお礼申し上げたいが、まず、時には厳しく、全体的には暖かく見守っていただいている、中部大学理事長・総長飯吉厚夫氏に感謝の意を述べたい。また、事業を進めるにあたり、新事業にもかかわらずスムーズな運営を行ってくださっている、副学長研究推進機構・機構長太田明德教授、副機構長二宮善彦教授、研究推進事務部・部長石井和則氏、課長墨勝典氏、担当課長河地利彦氏、担当課長黒岩美由紀氏、水野恵子氏、北原由美子氏にも感謝の意を述べるしだいである。そして、常にご協力いただいているメンバーである、中部大学学長特別顧問後藤俊夫教授、理事長付松井信行特任教授、顧問（理事長付）毛利徹氏、顧問長田義仁氏、経営情報学部高橋道郎教授、全学共通教育室田中基彦教授、工学部佐藤元泰教授、人文学部玉田敦子准教授、国際関係学部桃井治郎講師、中部高等学術研究所客員教授崎川茂郎氏、地域連携教育推進部・部長庄山正志氏、課長梅村勝利氏、超伝導センター特任教授の鯉沼秀臣氏、高野廣久氏、超伝導センター客員教授の佐々木浩二氏、小田部荘司氏、松下照男氏、北口仁氏、福田（畑）良輔氏、長村光造氏、江浦隆氏、酒井吉廣氏、細山謙二氏、二ノ宮晃氏、日野友明氏、Milos Skoric 氏の各氏に心からのお礼申し上げる。

多くの方々の貢献により、低炭素社会への第一歩となる超伝導送配電システムの研究開発の拠点が築かれていくこととなると思うと身の引き締まる思いである。今後ともご協力ご鞭撻をお願いするところである。

最後になるが、同センターの廣田篤、武藤京美、秋山光、山腰眞理子、大学院生・学生として協力してくれているタロウリ・モハメド、山内健吾の各氏の名前を記して感謝の意を表したい。

研究者リスト

中部大学 超伝導・持続可能エネルギー研究センター

山口 作太郎 (センター長・教授)	超伝導送電システム
筑本 知子 (教授)	超伝導送電システム
井上 徳之 (教授)	超伝導技術の普及に関するサンエンスコミュニケーション
浜辺 誠 (准教授)	超伝導ケーブル
渡邊 裕文 (准教授)	超伝導ケーブル断熱管
ユーリ・イワノフ (准教授)	超伝導システムの冷却循環系
河原 敏男 (工学部・教授)	超伝導計測系
孫 建 (研究員)	超伝導ケーブル
芳村 幸治 (研究員)	太陽光電池システムの開発
岩田 暢祐 (研究員)	超伝導ケーブル
ビャトキン・ウラジミール (研究員)	超伝導モーターと PCL

予算支出状況

平成23年度	設備費： 5,585千円
	研究費： 40,907千円
平成24年度	設備費： 11,970千円
	研究費： 38,484千円
平成25年度	設備費： 17,317千円
	研究費： 37,199千円
平成26年度	研究費： 54,462千円
平成27年度	研究費： 45,645千円

研究に携わった学生数

平成23年度：	大学院生	1名	学部生	4名
平成24年度：	大学院生	2名	学部生	10名
平成25年度：	大学院生	2名	学部生	7名
平成26年度：	大学院生	1名	学部生	1名
平成27年度：	大学院生	2名	学部生	6名

訪問者数

平成23年度：	約150名
平成24年度：	約90名
平成25年度：	約100名
平成26年度：	約100名
平成27年度：	約100名

目次

はじめに

謝辞

第1章 超伝導送電システムの概要	1
1.1 超伝導ケーブルの現状と課題	1
1.2 実用化のための課題と対策	2
第2章 平成27年度研究成果報告	13
2.1 ペルチェ電流リードに対する水冷の効果	13
2.2 長尺ケーブルシステムにおける臨界電流分布	15
2.3 テープ線材の電流分布特性	21
2.4 強磁性材料を用いた積層導体の臨界電流特性	30
第3章 平成23年度～26年度成果のまとめ	33
3.1 200m級超伝導直流送電実証実験装置での実験	33
3.1.1 冷凍循環試験	33
3.1.2 サーマルサイフォン実験	38
3.2 接続部の抵抗のばらつきによる偏流と交流損失	39
3.3 断熱2重管の熱侵入量測定	41
3.4 ペルチェ電流リード(PCL)の特性評価	41
3.5 高電流化を目指した積層導体の臨界電流特性評価	42
3.6 過電流通電時および電流遮断後テープ線材の電流分布特性評価	43
3.7 直流太陽電池システムの開発	45
3.8 低温電力変換器の特性	46
3.9 半導体材料の加工	47
第4章 まとめと展望	49
4.1 CASER-2 実験まとめ	49
4.2 航空機での超伝導給配電ケーブルについて	50
4.3 LNG冷熱利用及び超伝導送電システムのコストについて	53
研究業績一覧	58
論文集	
付録 テレビ・新聞・雑誌・シンポジウム案内・研究会・展示会・パンフレット	

第1章 超伝導送電システムの概要

本章では超伝導送電システムを概観してみたいと思う。本年は本事業5ヶ年の研究が終了し、同時に経済産業省からの委託で進んでいる「石狩プロジェクト」の最終年度になっていることもあり、今までの経過を振り返り、現時点での到達点と今後の課題について議論を行うと同時に「石狩プロジェクト」の成果についても一部紹介する。

1.1 超伝導ケーブルの現状と課題

1987年に高温超伝導体(HTS)が発見されてから直ぐに(1989年)大規模太陽電池からの電力を超伝導直流送電によって世界各国を送る直流電力網の提案[1]があった。これは超長距離送電の直流高圧送電である。2000年以降になって、高温超伝導線材が工業的に安定して使える状況になり、同様な提案[2,3,4]があり、ケーブルとしての実験が進んでいる。

一方、一般にケーブルの抵抗が無視できるため、電圧が低く、電流が大きいパラメータの選択は原理的に可能であるが、システムとして考える必要がある。ケーブルの電圧を高くするには絶縁電圧を上げることになるが、これは絶縁紙が増えることになる。一方、電流を大きくするには多くのHTSテープ線材が必要になるため、同じ電力を輸送するにはケーブル価格は上がる。一方、直流送電では両端に交直電力変換器が必要になるが、一般に電圧が低いと価格は下がる方向になる。更に、電圧が低いと短絡電流も下がるため、安全機器なども容易になると同時に安価になる。特に、ケーブルの電気抵抗がゼロになるため、インピーダンスが銅やアルミケーブルに比べて大きく下がるため、短絡電流保護についての今後詳細な検討は必要である。これらの理由から、技術・経済的には低電圧が指向される。一方、今までの超伝導直流ケーブルは同軸構造を取ることが多いが、これは極めてインピーダンスが下がる[5]。このため、100kV以上の高圧では単芯ケーブルの検討が必要になるだろう。同時に、ケーブルと断熱2重管の複合構造も検討が必要になる。更に、電圧・電流の選択では、「コロナ」(=大気の電気絶縁破壊現象)を考えることも有用であろう。多くの電力機器ではコロナを避けるために30kV以下で利用される。例えば、新幹線である。空气中で電気絶縁が破壊されると、安全に大電力を利用するためには色々な対策が必要になるため、基本的に高価格になるからである。

一方、電源が直流の場合には(太陽光発電や燃料電池など)変換器はDC/DC変換器が利用されることも多い。これは需要側が最終的には直流利用が多いためである。一般には直流-交流(交直)変換器に比べて高効率で安価である。現在、家庭や工場、オフィスでは90%以上の最終需要が直流である。このため、NEDOではDCエコハウスなどの計画も実施された。したがって、超伝導直流ケーブルの需要端でもDC/DCコンバータが多く利用される可能性が高い。したがって、それぞれの需要先の要望に応じてシステム全体として最適な電圧・電流を選択する必要がある。そして、応用先に応じて最重要課題を選択し、電力変換器も含めて開発を進める必要がある。以上の意味で、実用化を進めるときには超

伝導直流送電システムとしてのできあがり具合を見て、最適な電圧・電流を決めていくことになる。

一方、HTS 発見直後からケーブルへの応用は直ぐに始まった。そして、2010 年位までは交流ケーブル[6]の研究発表が一般的であったが、その後、直流ケーブル[7,8]の研究開発も需要を想定して広く行われるようになって来た。現在、日本では北海道・石狩で直流ケーブルの実証研究[9]が行われている。直流ケーブルの開発が世界的にも進み出したのは、超伝導現象が「直流」と相性が良いからである。具体的には、交流を流すと「交流損」と言われる複数の物理プロセスがあり、ケーブル自身が発熱するからである。これには HTS 線材の発熱の他に電気絶縁物の発熱（誘電体損と言う）がある。また、それ以外に断熱 2 重管が通常は金属で作られるため、ケーブルの外に交流磁場が出てくると断熱 2 重管が渦電流によって発熱する。このような交流損は銅やアルミケーブルでもあり、常温で利用するケーブルでは発熱の程度に依存するが大気や海水、地中に熱が放散されるので、多くの場合では冷却装置は必要ない。しかしながら、超伝導ケーブルでは、それらの発熱が液体窒素温度などの低温で発生するため、この熱を常温まで汲み出すには大型冷凍機が必要になる。冷凍機 COP (Coefficient of Performance, 成績係数)は常温からの温度差が大きいいため、発熱の少なくとも 10 倍 (COP=0.1) の電力が消費される。一方、直流ケーブルではこれらの交流損問題を避けることができる。

更に、直流ケーブルの特長に「設備利用率」が高いことがある。直流では full operation では、電圧も電流も最大定格で運転できる。一方、交流では電圧と電流が変化するため、実効値はピーク電圧電流の (=最大定格電圧電流) よりもそれぞれ $1/\sqrt{2}$ になる。つまり、電力では直流最大定格の半分しか利用できないのである。このため、HTS 線材が高価なこともあり（銅ケーブルなどでも交流 3 相を利用するのは導体コストを下げるためである）、直流が選好される。

また、ドイツ・エッセン市や米国 Albany, NY や横浜では交流ケーブルが系統に接続された実用化研究[10,11,12]が行われている。交流利用を進める主な理由は、市場が大きいことである。しかし、上記に述べたように損失やコストに拘わる問題があるため技術的な難度は高い。このため、超伝導交流ケーブルをする他の理由が求められているのであろう。特に、今までの複数の異なった設計の交流ケーブルが作られてきているが、それらの設計には長所・短所があるため、現段階で再度 review を行った方が良い段階と考えている。

1.2 実用化のための課題と対策

現在、複数の超伝導機器が実用化されている。例えば、病院などで人体の断層写真を得るための MRI の超伝導マグネットやシリコン単結晶を製造するチョコラスキー法装置に超伝導マグネットが組み込まれている。更に、科学技術関係では超伝導マグネットが多数使われている。例えば、加速器や核融合実験装置では超伝導マグネットがなかったら実験が成り立たない状況である。つまり、強磁場を発生するマグネットでは超伝導技術はほぼ実

用化されていると言って良い。このため、超伝導ケーブルの当面の応用と課題を考える上では、超伝導マグネットとの比較を考えてみると状況が明確になると思われる。

磁場を発生するためのマグネット設計では、導体の電流密度が高く、電磁力支持構造と発熱があれば、その除熱が設計の基本になる。銅コイルでは、電流密度は強制水冷却で 5 A/mm^2 が限度と言われている。一部、特殊なマグネットでは液体窒素を利用する場合があるが、これは銅の電気抵抗率が常温より $1/10$ ほどになるために、発熱が抑えられることもある。一方、超伝導マグネットでは、電流密度を 10 倍以上高くしても発熱がなく、コイルが薄く作れる。このため、マグネットは小型になるので小さいクライオスタットに納めることができ、クライオスタットへの熱侵入量が小さく無視できる。このため、現在では高磁場利用では超伝導マグネット利用が標準的になっている。

一方、超伝導ケーブルでは導体部分が小型になるが、構造としては細長いのでケーブル体積に比べてクライオスタット表面積が超伝導マグネットに比べて著しく大きくなる。このため、クライオスタットへの熱侵入量の低減が実用化に当たっての最も重要な課題[13]になると考えて研究開発を始めた。

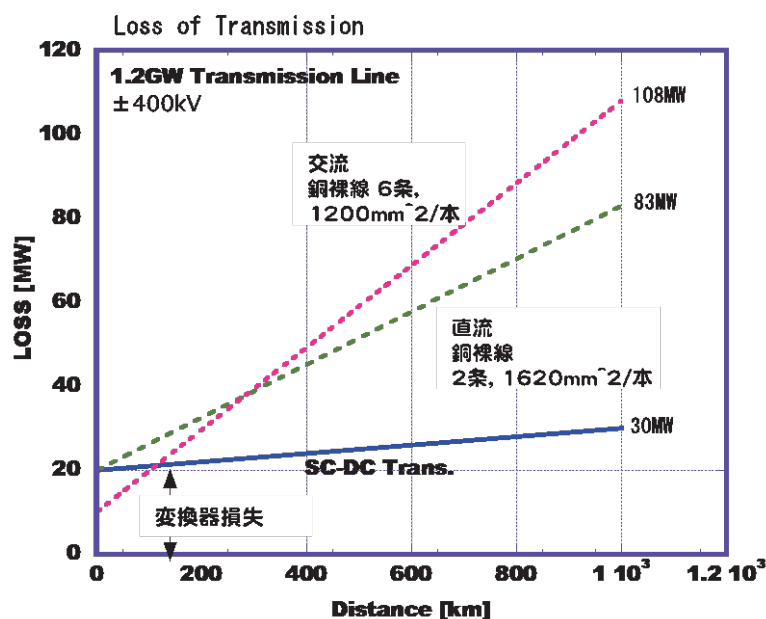


図 1-1 架空アルミケーブル（直流及び交流）と超伝導ケーブルの損失比較[14]

実際、長尺の超伝導ケーブルの損失は断熱 2 重管（ケーブル用クライオスタット）の熱侵入量で決まっている。この熱侵入量が多いと銅やアルミケーブルに比べて超伝導ケーブルの損失が大きくなる。このため、一つの目安として 1 W/m が長い間の目標値とされてきた。図 1-1 に従来のアルミ架空線での損失[14]と超伝導ケーブルの損失を比較した。これは ABB 社の HVDC の資料からの引用であり、電圧は AC400kV, DC±400kV としている。三相交流は 6 条の銅裸線で送電するとしている。一条の断面積は 1200 mm^2 であるので、合

計 7200mm² の断面積になる。一方、直流は一条の断面積が 1620mm² であり、合計で 3240mm² となる。これからケーブル断面積が直流では半分以下にも拘わらず、損失が少ないことが分かる。また、ケーブル電流が 1500A であるため、電流密度は 1A/mm² より少ない。交流ケーブルでは 0.87A/mm² 程度になる。これは交流抵抗と直流抵抗の違いである。一方、日本では多くの交流ケーブルが 3A/mm² 程度の値で設計され、極めて設備利用率が高い部分で 1A/mm² 程度である。したがって、この例はケーブル損失を極めて低い設計で行っていることが分かる。更に交流では無効電力が増大することも考えなくてはならない。この様な架空線では鉄塔の高さが無効電力の増大に大きな影響力があるため、一般に長距離送電では電圧を上げるだけでなく、鉄塔を高くする。これらの理由のため、ABB 社では長距離送電には直流が向いているとしている。尚、距離ゼロでの損失は電力変換器損失やトランスでの損失が含まれている。この図には、超伝導直流送電の損失が書き込まれているが、これは下記の様な仮定をしている。

1) 冷凍機の COP=0.1

2) 断熱 2 重管の熱侵入量を 1W/m (冷媒は往復循環するため、往復の合計値)

である。これらについては、本節で再度議論をするが、現時点 (2016 年 3 月) で実験的にほぼ到達された状況である。

さて、図 1-1 から超伝導直流送電を実現する上での上記の仮定の他に重要な条件が出てくる。最初に設備利用率に関することを議論する。アルミや銅ケーブルでは、損失は通電時にしか生じない。しかし、超伝導ケーブルでは常に冷却を継続する必要があるため、通電に依らず同じ電力が冷凍機で消費される。この例では超伝導直流送電とアルミケーブルでの送電損失比は 6.3 倍程度 (もし、鋼心アルミ裸線を利用すると 10 倍となる) であり、100% 通電時の比較となるため、もし設備利用率が 50% となると、超伝導直流送電のメリットは 3.15 倍 (鋼心アルミ裸線では 5 倍) となる。したがって、超伝導ケーブルを利用するには設備利用率の高い応用先が求められる。その意味でインターネット・データセンター(iDC) では、設備利用率が 100% に近いいため、今までに iDC での利用[15]を追求してきた。また、日本では本州・四国を結ぶ直流送電線 (DC250kV) の利用率は 90% を越すということなので、このような場所での利用を最初に考えるべきである。

超伝導送電に限らず、日本の送電線コストは海外に比べて高価なので、設備利用率が低いことは設備投資の回収に長い時間が必要になる。また、一般に再生可能エネルギーでは設備利用率が低いため、ここでの利用を想定すると、超伝導直流送電についての上記の仮定値 (冷凍機 COP 及び断熱 2 重管の熱侵入量) を改善する必要がある。しかし、冷凍機の COP はカルノーサイクル効率で決まっているため上限があり、この値は上限値に近いため、改善は技術的に困難であろう。このため断熱 2 重管の性能を上げることが技術開発の基本となる。また、電力変換器損失を下げることも極めて重要である。電流型電力変換器では大きなインダクターが必要になるが、その損失が電力変換器損失の半分程度を占めるため、超伝導インダクター開発が必要になろう。実際、韓国では既に開発が始まっている。また、

単芯ケーブルでは断熱 2 重管外管に鋼管を利用しているため、通常より大きなインダクタンスが期待[5]できる。したがって、インダクター損失がほぼゼロになると、電力変換器損失が 20MW から 10MW 程度に下がることになる。

また、電圧型電力変換器では半導体素子の損失が大きいため、半導体素子の低損失化（シリコン半導体から SiC 半導体素子開発が進んでいる）や運転電圧を下げることで損失低減につながる。特に、超伝導送電では高い電圧を利用する理由はあまりないので、送電距離に依存するが、電圧を下げて電力変換器損失を下げるのが方策の一つとなろう。その観点から図 1-1 を見ると直流電流は 1.5kA であり、超伝導ケーブルでは今までに 10kA までのケーブルは作られたことがある。一方、石狩プロジェクトでは回線 1 は定格電流が 5kA である。したがって、例えば定格電流を 4.5kA にすると、同じ電力輸送には電圧は DC400kV から DC133kV になる。これは短絡電流を下げるると同時に電力変換器での損失とコストを下げることになる。

次に、熱侵入量について検討を行う。市販の MLI(multi-layer insulation)を 10 層程度利用すると、常温から液体窒素温度までの輻射による熱侵入量は 1 W/m^2 となるので、実際のケーブルでは 0.5 W/m 程度が期待できる。実際、文献[16]では 0.5 W/m が報告されている。しかし、取付方法や内管支持構造物材料や形状などによって大きく異なり、多くの断熱 2 重管では冷媒循環のために往復配管で $3.6 \text{ W/m} \sim 10 \text{ W/m}$ が複数の文献には明確には書かれていないが暗示されている。本報告書では石狩プロジェクトの結果が部分的に紹介されるが、冷媒循環のために往復配管合計で 1.4 W/m (回線 1) 及び 0.88 W/m (回線 2 輻射シールド付き) で得られている。したがって、ようやく MLI のカタログ値に近い値が実現しつつあると考えている。但し、実験では断熱 2 重管の内管を支持する FRP 材からの熱伝導による熱侵入があるため、構造や支持材料検討も引き続き必要である。そして、MLI を 20 層程度すると、輻射による熱輸送が 10 層に比べて 20%以下になる場合もあるため、次のステップでは 0.1 W/m を目指すことになる。この程度の熱侵入まで減少すると、銅やアルミを利用したケーブルでは工学的に到達不能(最大定格で損失比が 100 倍)になるため、超伝導技術を利用するメリットが確実になり、大電力輸送では超伝導ケーブルが標準選択になると思われる。一方、熱侵入低減の課題は、複数の複雑な物理プロセスが絡んでいるため、試作や基礎実験を通じて段階的にしか減らすことはできないであろう。しかし、経済性に関わることなのでメリットが多く、確実に進めることになる。ある意味では今世紀の 100 年に渡り重要な課題として開発が進むであろう。

次の課題は液体窒素循環に関連する事項である。ケーブルを一様に冷却するには液体窒素の循環が求められる。そして、断熱 2 重管のケーブルが導入されている配管では入口温度と出口温度の差は低い方が良く、上限値がある。一方、液体窒素温度の温度範囲では冷凍機 COP は、数度の違いで大きく異なると言われている。このため、70K 程度が一つの設計値となろう。一方、超伝導ケーブルの臨界電流は出口温度で決まる。このため、長い距離を流れても、ケーブル配管の出口温度は低い方が良い。このためには、流量が大きく、

断熱 2 重管の熱侵入量が低いことが求められる。後者は既に議論した。一方、流量を増すと液体窒素ポンプの能力を上げる必要がある。それで、これらの問題を概観するためにはケーブル長に対するポンプの吐出圧(ΔP)、流量(*FlowRate*)、出入口温度差(ΔT)、単位長さ当たりの熱侵入量(*HeatLeak*)のスケール則を検討する。スケール則は下記のように表される。

$$FlowRate \propto \frac{L}{\Delta T} \times HeatLeak \quad (1-1)$$

$$\Delta P \propto (FlowRate)^2 \times L = L^3 / (\Delta T \times HeatLeak)^2$$

したがって、もし断熱 2 重管の *HeatLeak* が一定であり、出入口温度差が同じであれば、ケーブル長が 1 桁長くなるとポンプ圧は 3 桁高くなる。

一方、中部大学の 200m ケーブル実験装置では下記のパラメータ[7]が得られた。

$$\begin{aligned} FlowRate &= 10L/min \\ HeatLeak &= 1.4W/m \\ \Delta T &= 1.0K \\ \Delta P &= 10kPa \end{aligned} \quad (1-2)$$

このため、一桁長い 2km のケーブルを考え、下記のパラメータであれば既存の機器で建設可能と思われた。

$$\begin{aligned} FlowRate &= 17.9L/min \\ HeatLeak &= 1.0W/m \\ \Delta T &= 4.0K \\ \Delta P &= 319kPa \end{aligned} \quad (1-3)$$

もちろん、他にも実現可能な組み合わせパラメータは複数あり、熱侵入量を 1.4W/m としても建設可能である。パラメータ選択にはポンプの吐出圧を上げることがあるが、ポンプ熱侵入量が増大し、配管系の耐圧を上げる必要がでてくる。特に、ベローズやコルゲート管を利用するため高圧力の選択は設計として得策ではない。

しかし、値(1-3)の検討結果では長さ 2km 程度のケーブルは建設可能であるが、10km を考えると建設は技術的に著しく困難になると思われた。良くてケーブルに沿って冷却ステーションを 5km 毎に設置することになる。これでは長距離送電線は工学的実現性が大きく損なわれるので、石狩プロジェクトでは今までとは違った新しいアイデアを試験する必要があった。もちろん、配管径を大きくする手段は残っているが、これは単位長さ当たりの熱侵入が増大させることもあり、最後の対策として残しておく必要がある。そして、流量

を落としても性能が変わらないシステムが求められている。また、熱侵入量の低減は一つ
 のアイデアでは簡単には解決しないので、段階的にしか良くならないと思われるためでも
 ある。更に、温度上昇はケーブル性能に直接関連するため、可能であれば熱侵入量はその
 ままでもケーブル配管の温度上昇を抑えることが可能になる方策が求められることになる。

この対策として、輻射シールド付き断熱 2 重管のアイデアを石狩プロジェクトの数年前
 から検討を行ってきっていた。これを紹介しよう。図 1-2 は輻射シールドがついた断熱 2 重
 管の断面構成と通常の断熱 2 重管断面構成である。液体窒素循環のために断熱 2 重管内管
 は 2 本から成っている。少し太い配管には内部にケーブルが納められているが、もう一本
 の配管はリターン管と言って空配管である。

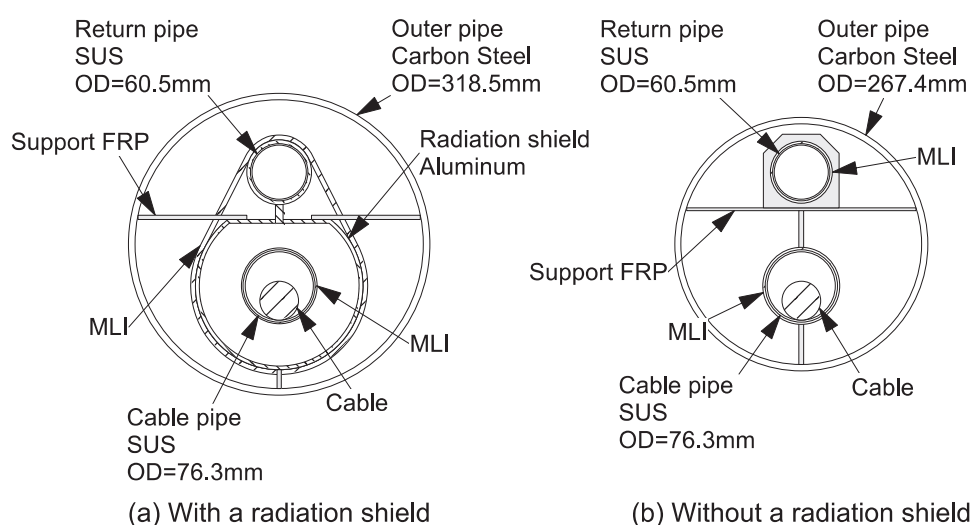


図 1-2 石狩プロジェクトでの断熱 2 重管断面 回線 2 輻射シールド付き (左) [9]

冷媒は最初ケーブル管に流し、次に折り返してリターン管に流す。すると、輻射シールド
 が無い構成では、ケーブル管の温度上昇がリターン管の温度上昇より少し高くなる。これ
 はケーブル管が少し太いからなどの理由である。実際、回線 1 では温度上昇が高いことが
 観測されている。

一方、輻射シールドをリターン管に付けると、外管からの輻射による熱侵入は基本的に
 リターン管に入り、ケーブル管にはほとんど熱侵入がなくなる。このため、ケーブル管の
 温度上昇は極めて小さくなり、流量を落とすことができる。実際、石狩プロジェクト回線 2
 では、流量が 30L/min であるとき、ケーブル管 480m 長で温度上昇は 19mK であった。し
 たがって、10 倍長くなり、5km ほどになっても、流量が同じでも出入口温度差は 0.2K 以
 下となる。このためケーブル性能を十分に生かすことができると同時に事故時の安全向上
 につながる。これは冷媒出口側のケーブル電圧が著しく高くないためである。そして、
 石狩プロジェクト回線 2 の輻射シールド付き断熱 2 重管の熱侵入量は 0.88W/m まで減少し

た。これは通常型の断熱 2 重管（回線 1）の熱侵入量の 60%程度となり、大幅に低減された。現在、詳細を解析中であるが、ケーブル管とリターン管を入れて長さが 2km となり、これを吐出圧 0.1MPa のポンプ一台で 30L/min の循環が可能になっている。このため、スケール則を利用すると 10km から 20km 程度の超伝導ケーブルの冷媒循環が技術的に可能と思われる。

なお、このような低圧力で長距離の冷媒循環が可能になった一つの理由として、断熱 2 重管に直管を利用したことがある。更に、直管利用は内管を FRP 構造物で支持するため、今までに用いられているコルゲート管に MLI を巻き、それにテフロン線等を巻いて内管を支持する方式に比べて熱侵入量の低減に大きく寄与している。このため、コルゲート管を利用した方式では断熱 2 重管ではなく、断熱 3 重管などの今までとは異なった構造が検討 [12]されていると聞いている。

次の課題も熱侵入量低減である。但し、端末クライオスタットでの熱侵入量低減である。超伝導ケーブルを電源及び負荷に接続する部分は常温となる。この部分は温度範囲が常温から液体窒素温度のため、銅などの金属材料を使うことになる。一方、銅などは電気抵抗は低い但同时に熱伝導率が高いため、長さや断面積には最適値が存在することになる。そして、最適設計を行い、電流リードを設計すると実際の熱侵入量としては、

$$\sim 50\text{W/kA} \quad (1-4)$$

である。一方、断熱 2 重管の熱侵入量は 1W/m を仮定すると、数百 m ほどの短いケーブルで低電圧・大電流ケーブルでは端末での熱侵入量が断熱 2 重管からの熱侵入量より大きくなる。具体的には iDC である。折角、設備利用率が高く、それほど長いケーブルが不要であるため、資金的にも実用化に近いと思われるにも拘わらず、超伝導ケーブルが使えないという事態に追い込まれる。したがって、端末電流リードでの熱侵入低減は超伝導ケーブルの実用化を考える上で極めて重要になる。この議論は文献[17]でも検討され、そして iDC に適用するための目標値は、

$$\sim 25\text{W/kA} \quad (1-5)$$

とされた。このため、中部大学では低熱侵入電流リードの開発[18]を長年行って来た。材料的には電気は通すが、熱は通さない材料を用いることになるので、物理的には矛盾した要請となり、スマートなアイデアが必要である。ペルチェ効果を利用した一例（ペルチェ電流リード PCL）を図 1-3 に示す。

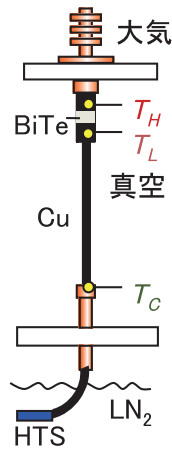


図 1-3 ペルチェ電流リード (PCL) の基本構成[18]

そして、石狩プロジェクト向けに複数の PCL を試作し、テストスタンドで熱侵入量測定実験を行った。図 1-4 にその結果の一部[19]を示す。

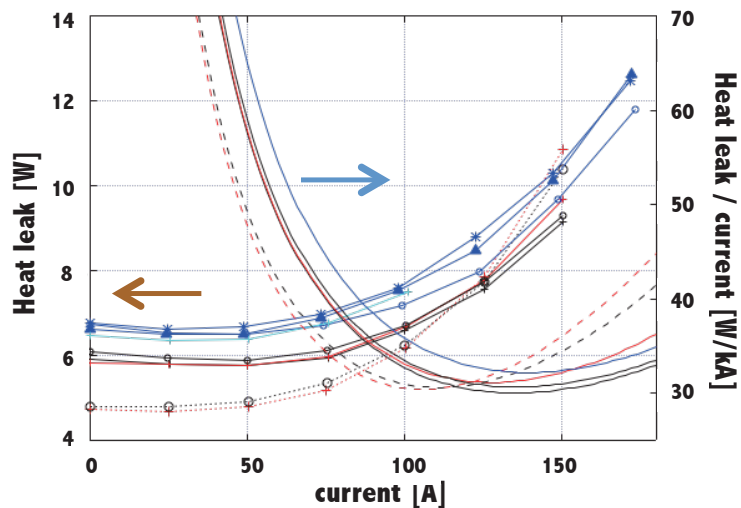


図 1-4 石狩プロジェクト向け試作 PCL の電流と熱侵入量特性結果[19]

横軸は電流であり、左縦軸は熱侵入量[W]、右縦軸は電流で規格化した熱侵入量[W/kA]である。これから分かるように現時点では最適値で

$$\sim 30\text{W/kA} \quad (1-6)$$

であり、目標値(= 25W/kA)にはもう少し改善する必要がある。現在、電流リードからの熱侵入低減には、多段電流リードと言われる方法が提案[20,21]されている。幾つかの設計例では目標値より低い熱侵入量が得られている。残念ながら、現時点ではまだ実験が行われていない状況であり、これからの研究が待たれる。

熱侵入量の低減について 2 つほどの話題を述べてきたが、この節の最後に液体窒素ではなく、液化天然ガス（メタンが主成分であり、温度は 112K 程度）を利用したシステム[22]について述べよう。この例では現在は捨てている LNG 冷熱を利用して、液体窒素で冷却を行っている低温系への断熱 2 重管と電流リードからの熱侵入を 95%以上削減する提案を行っている。つまり、電流リードについては実効的には

$$\sim 1.5\text{W/kA} \quad (1-7)$$

であり、断熱 2 重管については

$$\sim 50\text{mW/m} \quad (1-8)$$

となり、著しく改善される。LNG は可燃性であるが、日本は世界一輸入量が多く、95%以上の冷熱を捨てている現状から鑑み、同時に、シェールガス革命を通じて、世界中で広く LNG が使われる可能性が高いため、日本だけでなく世界で今世紀に広く利用できる技術になると思われる。このため、LNG 冷熱利用が超伝導ケーブルの実用化の一番近い道筋とも考えられる。

文献

- [1] Y. Kuwano, “PROGRESS OF AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS”, 4th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sydney, Australia (February, 1989), 桑野幸徳「グローバルエネルギーネットワーク -ジェネシス計画の提案-」サンシャインジャーナル 1990, Vol.11 No.1(1990).
- [2] Kosuke Kurokawa, Keiichi Komoto, Peter van der Vleuten, David Faiman, “energy from the desert, Practical proposals for very large scale photovoltaic systems”, Earthscan UK, 2007.
- [3] 鯉沼秀臣 <https://ja.wikipedia.org/wiki/サハラソーラーブリーダー計画>
- [4] 北澤宏一, 「科学技術者からみた日本・経済の夢」、丸善アドスリー (2002)
- [5] S. Yamaguchi, T. Fujii, M. Sugino, Makoto Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, “Iron-steel cryogenic pipe for DC superconducting power transmission line”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 21, p. 1046 (2011).
- [6] 湯村、増田、畑他, 「長尺三芯一括型高温超電導ケーブルによる世界初の実線路建設と商用運転(米国 ALBANY プロジェクト)」、SEI テクニカルレビュー・第 170 号, p. 10 (2007 年 1 月) .

- [7] S. Yamaguchi, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Yu. Ivanov, J. Sun and A. Iiyoshi, “Experiment of 200-meter superconducting DC cable system in Chubu University,” *Physica C*, vol. 471, pp. 1300-1303, 2011.
- [8] Xuemin Liang, Shaotao Dai, Zhiyuan Gao, Naihao Song, Yinshun Wang, Dong Zhang, Zhifeng Zhang, Fengyuan Zhang, Zhiqin Zhu, Xi Xu, Tianbin Huang, Xiaochun Li, Zhicheng Cao, Yubao Lin, Liangzhen Lin, Liye Xiao, “Design of a 380 m DC HTS Power Cable”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 20, p. 1259, 2010.
- [9] S. Yamaguchi, H. Koshizuka, K. Hayashi, T. Sawamura, “Concept and Design of 500 meter and 1000 meter DC Superconducting Power Cable in Ishikari, Japan”, *IEEE Applied Supercond.*, Vol. 25, (2015)5402504.
- [10] C. S. Weber, R. Lee, S. Ringo, T. Masuda, H. Yumura, J. Moscovic, “Testing and Demonstration Results of the 350 m Long HTS Cable System Installed in Albany, NY”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 17, p. 2038, 2007.
- [11] 大屋正, 渡部充彦, 湯村洋康, 中西辰雄, 広田博史, 増田孝人, 廣瀬正幸, 大野隆介, 下田将大, 仲村直子, 矢口広晴, 市川裕士, 三村智男, 本庄昇一, 原築志, 「三心一括型超電導ケーブルによる国内初の実系統送電(高温超電導ケーブル実証プロジェクト)」SEIテクニカルレビュー・第182号, p.39 (2013年1月).
- [12] M. Stemmler, F. Merschel, M. Noe, A. Hobl, “Ampacity project — Worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center”, 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), p. 1, 2013.
- [13] M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Y. Ishiguro, O. Shinshi, “High accuracy measurement of heat leak of cryogenic pipe for DC superconducting power cable”, Proc. 23rd International Cryogenic Engineering Conf. and International Cryogenic Materials Conf. 2010, pp. 639-643, Wroctaw, Poland, 2011.
- [14] 以下の資料に超伝導ケーブルの損失を付け加えた。図 1-1 において鋼心アルミ電力線とすると電力損失を 30%程度低めに見積っていると思われる（昭和電線便覧・鋼心アルミより線のデータから）われ、銅裸線とすると温度が 60℃程度で見積りがあうため、通常は鋼心アルミ裸線を利用するが、図中には銅裸線と表示した。尚、ABB のサイトは下記。
<http://new.abb.com/systems/hvdc/why-hvdc/economic-and-environmental-advantages>
- [15] S. Yamaguchi, “DC cable for Data Center”, Research, Fabrication and Applications of Bi-2223 HTS Wires Downloaded from www.worldscientific.com, Chapter 3.8, pp. 301-314, March, 2016.

- [16] M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Y. Ishiguro, O. Shinshi, "High accuracy measurement of heat leak of cryogenic pipe for DC superconducting power cable", Proc. 23rd International Cryogenic Engineering Conf. and International Cryogenic Materials Conf. 2010, pp. 639-643, Wroctaw, Poland, 2011.
- [17] Navigant Consulting, "Costing predictions of Superconducting components in 2008-2012".
- [18] S. Yamaguchi, Y. Hasegawa, H. Okumura, K. Sato, Rev. Sci. Instr. **75**, 207(2004).
- [19] S. Miyata, Y. Yoshiwara, H. Watanabe, K. Yamauchi, K. Makino, S. Yamaguchi, 12th European Conference of Applied Superconductivity, 2A-LS-P-07.04, 2015.
- [20] L. Bromberg, P. C. Michael, J. V. Minervini, C. Miles, AIP Conf. Proc. 1218(2010)577-584.
- [21] S. Yamaguchi, M. Emoto, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, N. Yamamoto, A. Iiyoshi, Physics Procedia, **27**, 448(2012).
- [22] S. Yamaguchi, H. Watanabe, Yu. Ivanov, V. Vyatkin, N. Chikumoto, M. Emoto, "Proposal for an actual reduction of heat leak of HTS cable system using Liquid Natural Gas (LNG)", IWC-HTS, Matsue, Japan, Oct. 2015, submitted to Cryogenics.

第2章 平成27年度研究成果報告

本章において、平成27年度に私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」プロジェクトで行われた研究についてまとめる。

2.1 ペルチェ電流リードに対する水冷の効果

Input of the transport current into the HTS cable cryostat always causes additional heat leak through the current leads. Before, it was proposed to use a Peltier element as a heat pump installed in conventional current lead in order to solve this problem. At present, the Peltier current leads (PCLs) are used in the 500 m and 1000 m DC superconducting power transmission systems in Ishikari. The optimization of the PCLs is necessary for wide distribution of this technology in the HTS DC superconducting applications. At the current research stage, PCLs are equipped with water-cooled jacket to decrease the temperature of the hot terminal of the Peltier elements (see Fig. 2-1). The amount of the heat incoming into the cold area through PCLs was measured by the amount of the evaporated nitrogen gas. In order to minimize heat leak from other sources, lower liquid nitrogen (LN₂) tank used for the measurements is surrounded by copper heat screen being in heat contact with second (upper) LN₂ tank, as shown in Fig. 2-2. Therefore, the heat flow into the lower tank was only from the heat flow through the current leads and resistive losses in the PCLs.

The correspondence between the evaporated gas flow rate and the heat leak from the PCL was measured after the preliminary calibration of the device. As can be seen from Fig. 2-2, outlet pipe from lower tank goes through the upper tank to be cooled to prevent heat leak though pipe material. However, the temperature difference between tanks should be taken into account in order to avoid the vapor condensation in the pipe. For this reason, the pressure in the upper tank was maintained to be higher. During the experiment, the pressure in the tanks reached 0.3 bar due to the high flowmeters' resistance. The experiment was carried out at the current varied stepwise from 0 A to 175 A in increments of 25 A. The time dependence of the standard gas flow rate is shown in Fig 2-3. After each current increase, it was necessary to wait enough time until the system has reached steady state. Fig. 2-4 shows the dependences of the total heat leak and the specific heat leak per 1 kA on the transport current. One can see the minimum on the last-mentioned curve at about 110 A that corresponds to the optimal mode of operation of the PCL. Optimal specific heat leak is about 33 W/kA. This value is significantly lower than 50 W/kA that is typical for conventional copper current leads. It should be noted that the decrease in transport current causes a marked increase in the

specific heat leak whereas the increase in the current has little effect on the leak. Therefore, the working range of the PCL is quite wide and is approximately 90-150 A.

The proposed method of measurement is valid for the testing of all types of PCLs for HTS devices. It will be used in the future research to study the behavior of PCLs at different working conditions.

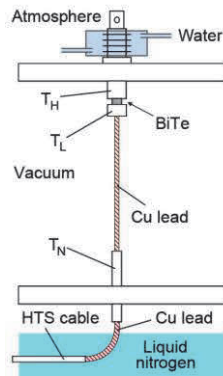


Fig. 2-1. Sketch of the Peltier current lead (PCL). Top (hot) part of the PCL is cooled by the flowing water.

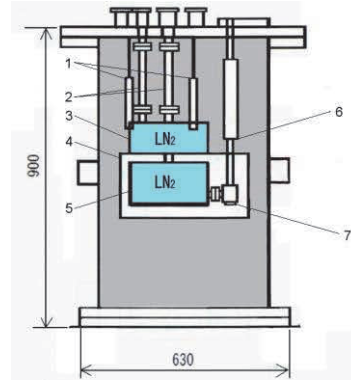


Fig. 2-2. The layout of the experimental device. 1 - heat isolating holders for holding the two LN₂ tanks in vacuum; 2 - flexible outlet pipes; 3 - upper tank for cooling down the heat screen (4) surrounding lower tank (5); 6 - PCL; 7 - copper block and heater connected to the PCL and lower LN₂ tank.

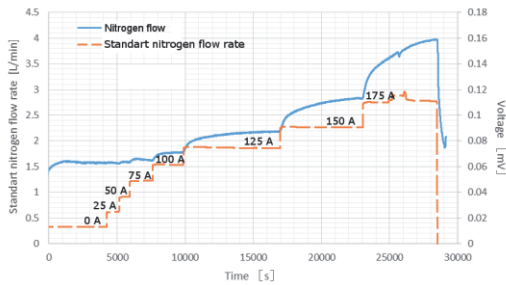


Fig. 2-3. Time dependences of the standard nitrogen gas flow rate and the voltage at the n-type Peltier element. Transport current was changed stepwise from 0 A to 175.

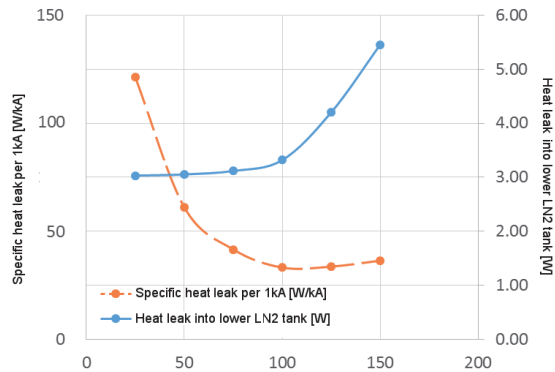


Fig. 2-4. Total heat leak and specific heat leak as a functions of the transport current.

References

- [1] Yamaguchi S., Yamaguchi T., Nakamura K., Hasegawa Y., Okumura H., Sato K. Peltier current lead experiment and their applications for superconducting magnets. *Rev. Sci. Instrum.* **75** (2004) 207-212.
- [2] Hamabe M., Fujii T., Yamamoto I., Sasaki A., Nasu Y., Yamaguchi S., Ninomiya A., Hoshino T., Ishiguro Y., Kawamura K. Recent progress of experiment on DC superconducting power transmission line in Chubu University. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 1778-1781.
- [3] Yamaguchi S., Koshizuka H., Hayashi K., Sawamura T. Concept and design of 500 meter and 1000 meter DC superconducting power cables in Ishikari, Japan. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) #5402504.
- [4] Yamauchi K., Ito M., Vyatkin V. S., Ivanov Y. V., Watanabe H., Miyata S., Inoue N., Yamaguchi S. Optimal current value evaluation test of Peltier current lead with water-cooled jacket. *Ext. Abstr. Int. Workshop Cooling-system HTS Appl. 2015.* (2015) PO2A-02.

2.2 長尺ケーブルシステムにおける臨界電流分布

2.2.1 Introduction

A DC HTS power cable is the promising high current application for the power transmission. AC losses are absent in the DC cable and the heat load arises from the ambient heat absorption and the Joule losses when the superconductor is in the resistive state at the current near critical. The cooling down of the cable is performed by the liquid nitrogen (LN2) pumping through the long cable cryostat. LN2 is under pressure and the heat losses increase the temperature of LN2 according to the heat capacity $C_{LN2} = 2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ (Chapter 6 of [1].)

The LN2 temperature and the cable temperature are different along the cable. In the input area the temperatures are lower than the temperatures in the output area. For the Ishikari project [2] the natural difference is about 1-3 K. The critical current density is highly sensitive on the temperature and the heat losses increase in the area where the temperature is higher. For the long cable the Joule losses per 1 meter of length in the hot area are higher than average Joule losses fixed by the criterion of critical current detecting (usually electrical field $E = 10^{-6}$ V/cm). The last experiment on the 500 m cable in Ishikari demonstrated the increasing of the temperature of LN2 at the outlet up to 1 K in case of the zero transport current. For the longer cable, the ambient heat losses will be higher and the temperature difference also will be larger. The heat

resulting from the Joule losses increases the temperature of the long length cable more and the Joule losses in the end of the cable is maximal.

2.2.2 The method of calculation

Fig. 2-5 shows the cross section of the inner part of the cryostat with the HTS cable. The size of the cryostat for analysis is taken like in the Ishikari project [2] and the CASER project [3]. The pressure of LN2 inside cryostat is about 2-3 bar. The temperature of evaporation of LN2 under this pressure is about 83-87 K [4] and the temperature of input LN2 is about 70-77 K.

For the calculation the ambient heat losses were taken into account. The values of initial temperature of LN2, T_{inlet} , and final temperature, T_{outlet} , are given as initial conditions. These values can be found more easily by direct measurement. The difference $\Delta T_{ambient} = T_{outlet} - T_{inlet}$ in the calculation was prescribed to be 1, 5, and 10 K.

The efficiency of cooling down the cable with Joule losses is proportional to the LN2 pumping rate. Pumping rate for the calculation was assumed to be 30 l/min. According to the geometry of the cable shown in the Fig. 2-5, the velocity of the liquid nitrogen flowing along the cryostat is $v_{LN2} = 0.35$ m/sec.

For calculation of the Joule losses in the HTS cable let's split the cable for N parts of equal size with index $i = 1..N$ and with length $l_i = \frac{L_{cable}}{N}$. Let's trace the portion of LN2 flowing through the cross section S_{cable} along the cable from inlet to outlet. The volume of each portion is $V_{LN2} = \frac{L_{cable} \cdot S_{cable}}{N}$. When this portion of LN2 comes into the next segment of the cable the temperature of this segment increases from two sources. One is the ambient heat losses. The temperature of LN2 in every segment increases by the same value $\Delta T_{i\ ambient} = (T_{outlet} - T_{inlet})/N$. The other is the Joule heat losses. The power of Joule heat losses per unit length is current multiply by electrical field of i -th segment, $P_i = I \cdot E_i$. Current is the same along the cable. It is the transport current I maintaining by the current source. The electrical field E_i depends on the local critical current of the cable $I_c(T_i)$ which depends on the local temperature of i -th segment T_i . The voltage-current dependence of i -th segment is power dependence with power index n as follows

$$E_i = E_0 \cdot \left(\frac{I}{I_c(T_i)} \right)^n, \quad (2-1)$$

where $E_0 = 10^{-6}$ V/cm is electrical field criterion of critical current.

The critical current of the cable $I_c(T_i)$ vs. temperature T_i was calculated from known dependence of the critical current density taken from [5] and given amount of

superconducting tapes (35 tapes) with known specified critical current of 190 A under 77 K. The dependence of critical current of the cable vs. temperature in the range 70-80 K is shown in the Fig. 2-6.

The Joule heat acts on the portion of LN2 near i th segment of the cable during time $t_i = l_i/v_{LN2}$. The increasing of the temperature of the portion of LN2 is $\Delta T_{i \text{ Joule}} =$

$$\frac{P_i \cdot t_i}{C_{LN2} \cdot \rho_{LN2} \cdot V_{LN2}},$$

where $\rho_{LN2} = 800 \text{ kg/m}^3$ is the density of LN2. After time t_i this portion of

LN2 will be near next segment of the cable. Than we can write the temperature of the next segment of the cable if we know the temperature of previous segment as

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T_{i \text{ ambient}} + \Delta T_{i \text{ Joule}}. \quad (2-2)$$

Now, it is possible to calculate the temperature of all segments of the cable because we know the initial temperature T_{inlet} of LN2. The sequential calculation with (2-2) gives the temperature distribution along the cable. The example of this dependence is shown in Fig. 2-7. Voltage at the ends of the cable is the result of summation of E_i from expressions (2-1) multiplied on the length of each segment l_i . The example of this dependence is shown on Fig. 2-8.

The value of N (the number of segments) was 50. This is enough to provide the accuracy of calculation about 0.1%.

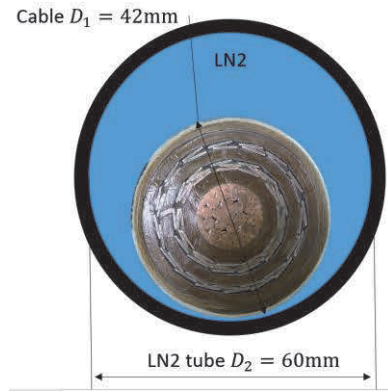


Fig. 2-5. Cross section of the inner part of the cable. The diameter of the cable is 42 mm, the diameter of the area with liquid nitrogen is 60 mm.

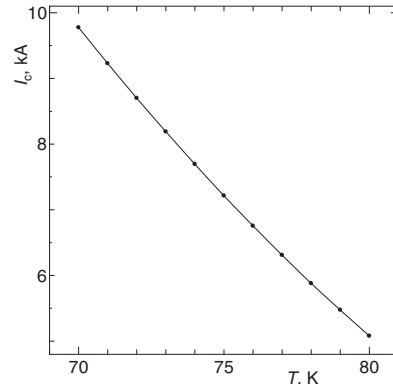


Fig. 2-6. The dependence of critical current of the cable made of 35 tapes of Bi2223. This dependence was recalculated from the experimental data from [5].

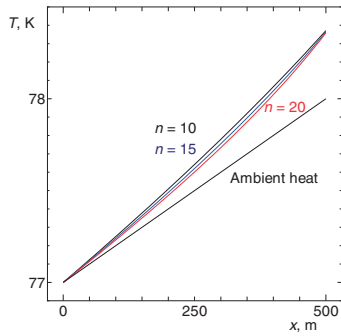


Fig. 2-7. Distribution of the temperature along the 500 m cable for different n -values.

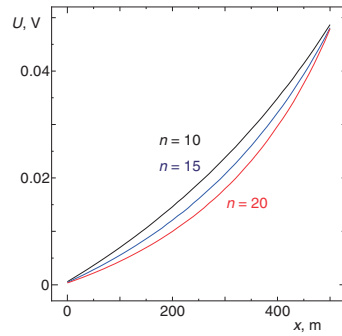


Fig. 2-8. Distribution of the voltage along the 500 m cable for different n -values.

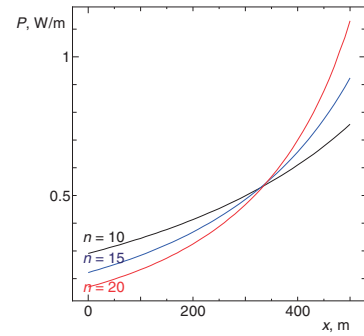


Fig. 2-9. Distribution of the DC heat losses along the 500 m cable for different n -values.

2.2.3 Result of calculation

Transport current values is calculated, when the voltage drop at the ends of the 500 m cable becomes $U = L_{cable} \cdot E_0 = 0.05 \text{ V}$. The Fig. 2-7~2-9 contain the data for the cables with n -values equal 10, 15 and 20.

The result of calculations of the temperature along the cable is presented in the Fig. 2-7. The deviation of the temperature distribution from the linear dependence of the ambient heat losses is visible, and it is maximal at the outlet. Fig. 2-8 contains the dependence of the voltage drop between the initial point of the cable and the point located at the distance x from the initial point. The critical current corresponds to the total voltage 0.05 V. The derivative of the dependence of voltage vs. coordinate (electrical field gradient, V/m) is higher at the end of the cable. Fig. 2-9 presents the DC heat losses along the cable.

It is possible to see that the maximal heat losses appear at the end of the cable and for applied conditions it is about 2 times higher than average heat losses. This phenomenon should be taken into account for calculation of the current carrying capacity.

Table 2-1. The value of electrical field (mV/m) at the initial / end point of the cable. The average electrical field is always $100 \mu\text{V/m}$.

n -value	T_{inlet}, K	$\Delta T_{amb}, \text{K}$	I_{nom}, A	$E_{in}, \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$	$E_{out}, \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$	$\frac{E_{out}}{E_{in}}$	I_{safe}, A	$\frac{(I_{safe} - I_{nom})}{I_{nom}} \cdot 100\%$	U_{safe}, mV
10	65	1	12750	62.85	151.3	2.41	12400	2.7	36.06
10	70	1	9770	61.36	149.4	2.43	9490	2.9	35.37
10	75	1	7215	59.97	150.6	2.51	6990	3.1	34.59
10	77	1	6312	59.35	151.8	2.56	6120	3.04	35.07

10	65	5	11180	16.89	315.1	18.66	10210	8.7	17.93
10	70	5	8400	13.54	346.4	25.58	7580	9.8	16.33
10	75	5	6020	9.807	370.6	37.79	5375	10.7	14.68
10	65	10	8915	1.756	573.7	326.7	7670	14	9.773
10	70	10	6410	0.9068	631.7	696.6	5440	15	8.73
15	65	1	12750	49.83	184.1	3.69	12440	2.4	31.19
15	70	1	9780	48.80	185.2	3.8	9520	2.7	30.44
15	75	1	7215	46.44	183.5	3.95	7010	2.8	29.50
15	77	1	6312	45.73	186.0	4.07	6125	2.96	29.20
15	65	5	11060	5.904	455.7	77.18	10240	7.4	12.98
15	70	5	8275	3.980	490.6	123.3	7600	8.2	11.76
15	75	5	5917	2.371	530.3	223.7	5388	8.9	10.58
15	65	10	8635	0.1441	790.7	5487	7670	1.1	6.994
15	70	10	6175	0.04931	848.4	17205	5440	1.2	6.376
20	65	1	12750	39.51	222.3	5.63	12470	2.2	27.24
20	70	1	9780	38.42	225.7	5.87	9545	2.4	26.71
20	75	1	7215	35.97	223.2	6.21	7030	2.6	25.97
20	77	1	6312	35.23	227.8	6.47	6140	2.7	25.49
20	65	5	10960	1.917	594.3	310	10260	6.4	10.27
20	70	5	8185	1.092	636.4	582.8	7610	7.03	9.27
20	75	5	5839	0.5223	677.3	1297	5392	7.7	8.344
20	65	10	8450	0.01056	943.4	89337	7680	9.1	5.807
20	70	10	6025	0.002382	987.4	414526	5445	9.6	5.367

The influence of the temperatures at the inlet and the outlet on current carrying capacity of the cable is presented in the Table 2-1. The average electrical field was $E_0 = 10^{-6}$ V/cm for all cases. First column of the table is the n -value of the cable. I_0 is the current of the cable under 77 K with criterion $E_0 = 10^{-6}$ V/cm. For all cases the value of

the initial critical current is $I_0 = 190 \text{ A} \cdot 35 \text{ tapes} = 6650 \text{ A}$. The change of the critical current vs. temperature occurs according to the Fig. 2-6. The nominal current I_{nom} is the calculated current when the ambient temperature changes from T_{inlet} up to T_{outlet} . The electrical field at the begin and the end of the cable is shown on column E_{in} and E_{out} , accordingly. The value of E_{in} is lower than $E_0 = 10^{-6} \text{ V/cm}$ and E_{out} is always higher than E_0 . The specific heat loss per 1 m is $E_{out} \cdot I_{nom}$ and this value is higher than the same corresponding to the average electrical field E_0 . To obtain the electrical field everywhere (especially at the end of the cable) less than E_0 it is necessary to reduce the transport current to I_{safe} . Under this current the voltage drop at the ends of the cable will be U_{safe} and the electrical field at the end of the cable will be $E_0 = 10^{-6} \text{ V/cm}$.

2.2.4 Discussion

The performed calculations show that the critical current with criterion of average electrical field $E_0 = 10^{-4} \text{ V/m}$ produces the local electrical field near the end of the cable several times higher than the average one. As one can see at the column E_{out} of Table 2-1 this difference can reach up to 10 times. During the work with DC superconducting cable it is possible to use the next strategies:

1. If it is not critical the 10 times increasing of the local heat losses in the cable compare with nominal DC heat losses corresponding the electrical field $E_0 = 10^{-4} \text{ V/m}$, for the short time measuring of the critical current, it is possible to increase the current up to average electrical field 10^{-4} V/m (for 500 m cable it is equal to 0.05 V). After measuring the critical current the working current should be decreased to safe value (column I_{safe} in the Table 2-1) when the electrical field is less than $E_0 = 10^{-4} \text{ V/m}$ in every part of the cable.
2. In the case if the electrical field should not be higher than $E_0 = 10^{-4} \text{ V/m}$ in the every part of the cable the current should not be higher than I_{safe} and the total voltage should not be higher than the value shown in the column U_{safe} . This current is about 10 % lower than nominal current when the average electrical field is $E_0 = 10^{-4} \text{ V/m}$. The safe voltage on the cable is several times less than 0.05 V obtained by 10^{-4} V/m criterion.

Because the increasing of the voltage occurs near the end of the cable with higher temperature it is possible to use the local cooler of the LN2 at the last part of the cable. For example in the point when graphs in the Fig. 2-9 cross each other. This method can increase the current carrying capacity up to I_{nom} .

2.2.5 Conclusion

The cooling down of the cable by flowing of LN2 without evaporation leads to the increasing of the temperature along the cable. Conventional criterion of critical current with average electrical field $E_0 = 10^{-6}$ V/cm does not provide the same value of the electrical field along the cable because the local critical current is different along the cable. Near the outlet of LN2 the temperature of the superconductor is maximal and the critical current is minimal. The calculations demonstrate that the local heat losses for the cable with n -value about 20 for 500 m cable will be several times higher than nominal. From the cable safety point of view the risk of overheating and damaging of the cable exists. For the cable longer than discussed the risk much increases. It means that for the long cables it is necessary to control the local voltage of the part of the cable and the local temperature especially near outlet of LN2 in the cable cryostat.

References

- [1] Ekin, Jack. *Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties and Superconductor Critical-Current Testing*. Oxford University Press, 2006.
- [2] Yamaguchi, Satarou, et al. "Concept and Design of 500 Meter and 1000 Meter DC Superconducting Power Cables in Ishikari, Japan." *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 25 (2015): 1-4.
- [3] Hamabe, Makoto, et al. "Status of a 200-meter DC superconducting power transmission cable after cooling cycles." *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 23 (2013): 5400204.
- [4] Jacobsen, Richard T., and Richard B. Stewart. "Thermodynamic properties of nitrogen including liquid and vapor phases from 63 K to 2000 K with pressures to 10,000 bar." *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. 2 (1973): 757-922.
- [5] Osamura, K., et al. "Factors suppressing transport critical current in Ag/Bi2223 tapes." *Journal of applied physics*. 79 (1996): 7877-7882.

2.3 テープ線材の電流分布特性

過電流パルスおよび電流遮断後の HTS テープ線材に残る電流の分布を実験的に計測し、テープ線材中の磁場の拡散及び均一性について検討した。このため、異なるタイプの HTS テープをモデル化し、一次元電流密度分布及び二次元電流密度分布（テープのため、厚さは無視した）を求めた。これは、1次元及び2次元の磁場分布測定を行うためのホールプローブを利用した実験装置を開発し、磁場分布をデータとして計算機に取り込んだ。次に、Biot Savart 法則の逆問題を解くための数値ソフトウェアを開発し HTS テープ内の一次元、

二次元の電流密度分布を得た。また、磁場測定の時定数を評価して、磁場のテープ線材中の拡散について議論を行った。その結果、十分に安定化材で保護された HTS テープ線材は短い過電流パルスによって破壊されることは観測されなかったが、Bi2223 系線材では、磁場拡散時間が通常の見積りとは大きく異なった。一方、Y123 系線材は、磁場拡散時間は通常の見積りに従った。このような違いは現在検討中である。また、HTS テープ線材の残留電流密度分布によって、線材の均一性について議論ができることが分かった。特に、電流密度分布が Vortex を作ることが観測され、これが再スタートにどのような影響を与えるかについての検討が必要になることが分かった。

2.3.1 Introduction

The residual current distribution in the high temperature superconducting (HTS) tapes effects the operation of power cables, superconducting magnets and other devices built using these tapes. This effect is crucial for restarting procedure of the devices after either emergency or scheduled shutdown or after the short circuit. Furthermore, current distribution along and across the HTS tape provides us with the information about the quality of the tape performance. In present paper we examine 2D residual current density distribution in different BSCCO and YBCO tapes by means of 3D Hall probe system after the emergency shutdown of the 100 A direct current. After the experimental measuring of the self-magnetic field near the tape inducted by residual current, the inverse problem solver aim at calculation of current density distribution throughout the tape is applied. The results of calculation show the strong asymmetry and vortex-like structure of 2D residual current flow in BSCCO tape while the current flow in YBCO tapes has a tendency to the symmetry about the center of the HTS tape. The significant difference in shape and amplitude of the residual current density profiles is observed as well.

2.3.2 Scheme of the experiment

The experimental device consists of an open cryostat in which different devices are mounted: 3D Hall probe scanning system, 2 stepping motors, and HTS tape fixed on a FRP (fiber reinforced plastic) plate. See the scheme in Fig. 2-10. We use three different tapes, one BSCCO tape and two coated YBCO tapes made by three different companies. Table 2-2 describes the characteristics of each HTS tape including their sizes, architecture, fabrication processing and critical currents.

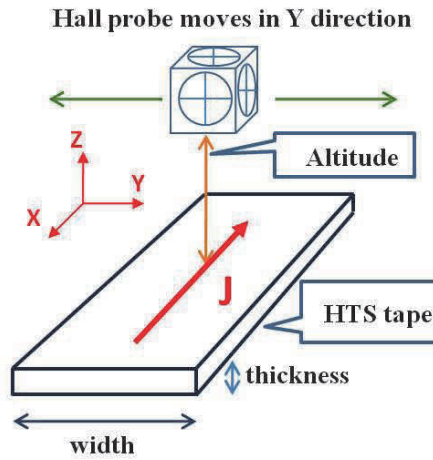


Fig. 2-10. The scheme of the experimental lay-out.

Table 2-2 Characteristics of HTS tapes

HTS tape	BSCCO (Sumitomo)	YBCO (AMSC)	YBCO (Fujikura)
Critical Current @77K	200 A	300 A	572 A
Width	4.5mm	12mm	10mm
Thickness	0.35mm	0.2mm	0.1mm
Processing	Powder in Tube	TFA-MOD	<i>PLD</i>
Superconductor's	BSCCO filaments in Cu/Ag	$YB_2C_3O_7$ layer,	$GdBCuO$ layer,

The 3D Hall probe system consists of 3 Hall probe sensors with $0.05 \times 0.05 \text{ mm}^2$ active areas. It moves across the tape in Y direction (tape's width) and in X direction (tape's length) at 0.3 mm altitude from the tape surface. The distance between sensors is 0.25 mm and its altitude shift was taken into account in data plotting. The Hall probe

current is set to be 10 mA for each Hall probe and the data sampling time is one second. The motor steps are controlled by Labview environment synchronously with the data acquisition system. Each increment in both X and Y directions is controlled by stepping motor system.

Transport DC current of 100 A was applied to each HTS tape during 20 minutes. After 20 minutes we switch off the DC current in 0.15 ms and then start scanning three components (B_x , B_y and B_z) of self-magnetic field of each HTS tape along the Y direction with 0.1 mm step as shown in Fig. 2-11. Afterwards we change the longitudinal location (X coordinate) of 3D-Hall probe system by 0.1 mm and repeat scanning in Y direction again. Total scanning distance along the X direction is almost 1 cm for each HTS tape. We get 3D self-magnetic field map shown in Fig. 2-12~2-14. During the experiment we keep the HTS tape and the Hall probe sensors in liquid nitrogen continuously by refilling the open cryostat.

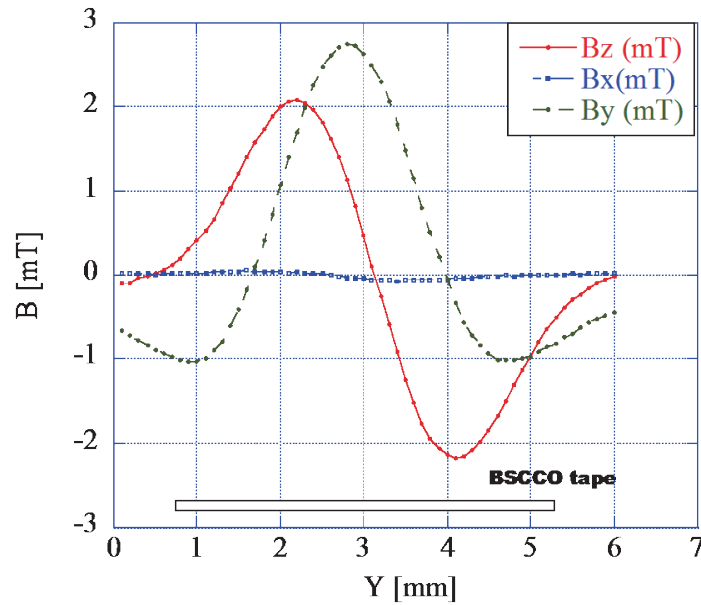


Fig. 2-11. Three components of the residual magnetic field (BSCCO tape).

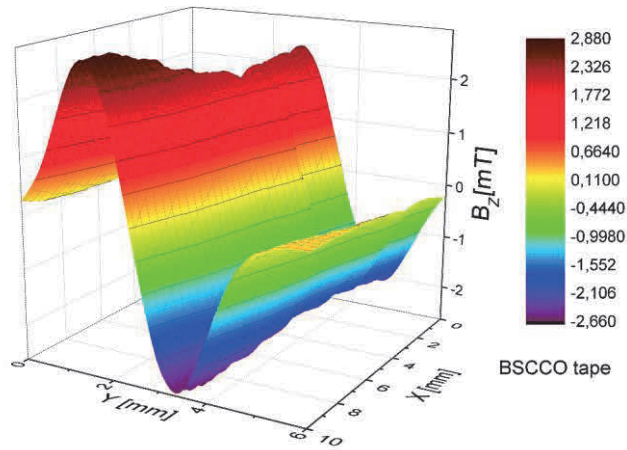


Fig. 2-12. B_z components of the 3D self-magnetic field map (BSCCO tape).

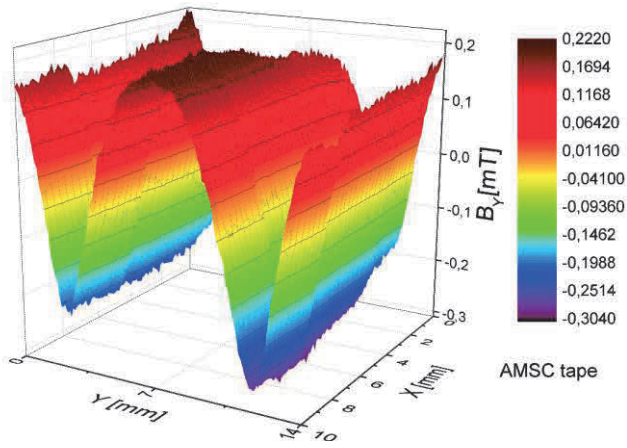


Fig. 2-13. B_y components of the 3D self-magnetic field map (AMSC tape).

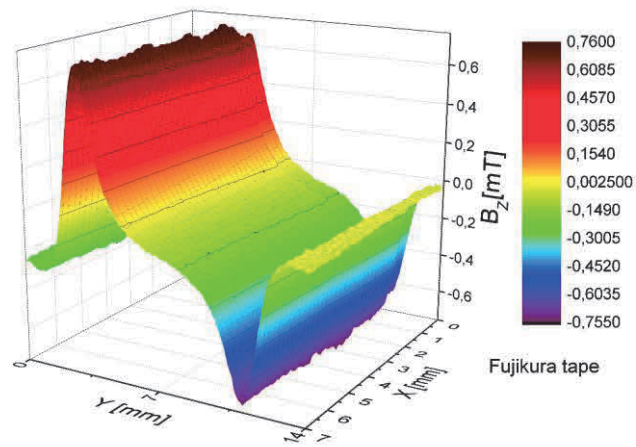


Fig. 2-14. B_z components of the 3D self-magnetic field map (Fujikura tape).

2.3.3 Inverse problem solution algorithms

To calculate the magnetic field above the HTS tape in an arbitrary position \mathbf{r}_d the Biot-Savart law in general form is used

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}_d) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\Sigma} \frac{[\mathbf{j} \times \mathbf{R}]}{R^3} dS \quad (2-3)$$

where $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + z_d^2}$ is the distance between the segment on the tape and detector position. All notations are shown on Fig. 2-15.

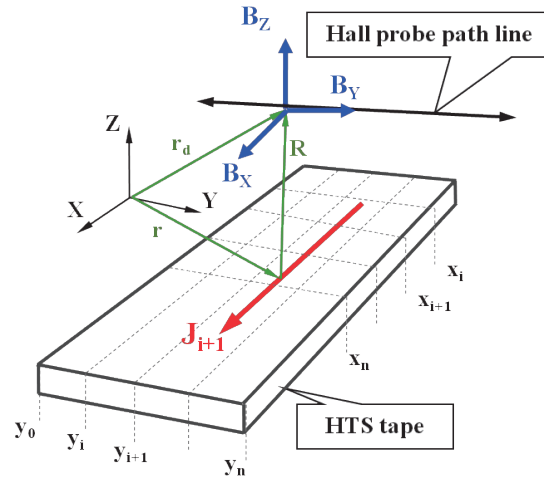


Fig. 2-15. The schematic representation of the experimental lay-out together with the HTS tape discretization used for the inverse problem solution algorithm.

The integration in expression (2-3) is performed through the surface Σ of the tape $dS=dx dy$, which is limited in Y direction by the width of the tape, and in the X direction it could be either limited manually or the integration could be performed in the range $(-\infty, \infty)$. The fact that the magnetic field decreases as $\sim 1/R^2$ makes the contribution of currents running on large distances negligible. After the integration in Cartesian coordinates including the fact of fast magnetic field decreases with the distance and assuming the local symmetry of the perpendicular current J_Y we obtain the next set of linear equations

$$\mathbf{B}_X(\mathbf{r}_d) = 2 \times 10^{-7} \sum_{i=1}^n J_{Yi} \left(\arctan \frac{y_d - y_i}{z_d} - \arctan \frac{y_d - y_{i-1}}{z_d} \right) \quad (2-4)$$

$$\mathbf{B}_Y(\mathbf{r}_d) = -2 \times 10^{-7} \sum_{i=1}^n J_{Xi} \left(\arctan \frac{y_d - y_i}{z_d} - \arctan \frac{y_d - y_{i-1}}{z_d} \right) \quad (2-5)$$

$$\mathbf{B}_Z(\mathbf{r}_d) = 10^{-7} \sum_{i=1}^n J_{Xi} \ln \frac{(y_d - y_{i-1})^2 + z_d^2}{(y_d - y_i)^2 + z_d^2} \quad (2-6)$$

The expression (2-6) fits to that used for calculations of 1D current distribution in previous papers [1,2]. These equations have the compact form

$$B_{Xk} = \sum_{i=1}^n A_{ki} J_{Yi}, \quad B_{Yk} = \sum_{i=1}^n B_{ki} J_{Xi}, \quad B_{Zk} = \sum_{i=1}^n C_{ki} J_{Xi}, \quad (2-7)$$

where A_{ki} , B_{ki} and C_{ki} are the components of the matrixes representing distances between the segment with the current and detector position.

The set of equations (2-7) should be enhanced with the additional equation that goes from the constraint on the total current value. For the case of transport current it is $J_{\text{tot}}=\text{const}$, and for the case of residual current $J_{\text{tot}}=0$. Afterwards, the equations will be solved by Cramer's rule, which is more stable for our case.

The advantages of this method are the fast calculation and low error level. The disadvantage of this method is the limited number of the resolved data points caused by the fact that the determinants of the matrixes consisting of elements A_{ki} , B_{ki} and C_{ki} approach to zero value with the increasing of number of data points. To avoid these problems the method of least squares is used. The idea of the method of least squares is to minimize the value of the error function by varying the model of the current density profile

$$\text{err} = \sum_i \sqrt{(B_{\text{exp}}(y_i) - B_{\text{calc}}(y_i))^2} \quad (2-8)$$

Here $B_{\text{exp}}(y_i)$ is the experimentally measured profile of the magnetic field, and $B_{\text{calc}}(y_i)$ is the magnetic field calculated from the model current density profile by means of Biot-Savart law. The algorithm of this method is as described further. Firstly, we scan the magnetic field above the tape and convert it in data array $B_{\text{exp}}(y_i)$. After that we define an arbitrary shape of the current density profile in HTS tape and calculate the self-magnetic field $B_{\text{calc}}(y_i)$ exactly in the same points where the experimental magnetic field is measured. The arbitrary current density profile is presented as an array with each element equal to the current density value in subtape J_i as shown on Fig. 2-15. Varying the values of current density in different subtapes we modify the magnetic field profile $B_{\text{calc}}(y_i)$. When the calculated profile approaches to the measured profile the error function value (2-8) reaches its minimum. That value is prescribed at the beginning of calculation. Hence, we obtain the current density profile in HTS tape with the error defined in advance. The crucial point of the method is to present the initial model current density profiles that will be used to initiate calculation. The initial shape of the profile could be an arbitrary, but in some cases, it will affect the result of calculation.

In the combined method as the first step, the solution of the set of linear equations is applied. It gives the preliminary profile, which is used as an input current density

profile in the method of least squares. This combination of two methods provides us with faster, more detailed and accurate analyze of current density distribution. Moreover, it allows the control of the multiple solution problems. This combined method we use for the calculation of 2D current density distribution in different HTS tapes.

2.3.4 Calculation results

We used the inverse problem technique discussed above to calculate 2D residual current density map for each HTS tape. We show the residual current distribution in the HTS tapes using a map of (J_x, J_y) current vectors with amplitude proportional to the residual current, as in Figs. 2-16~2-18.

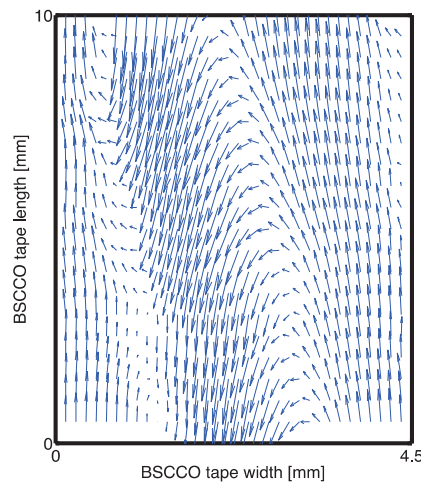


Fig. 2-16. Two-dimensional residual current density profiles in BSCCO tape.

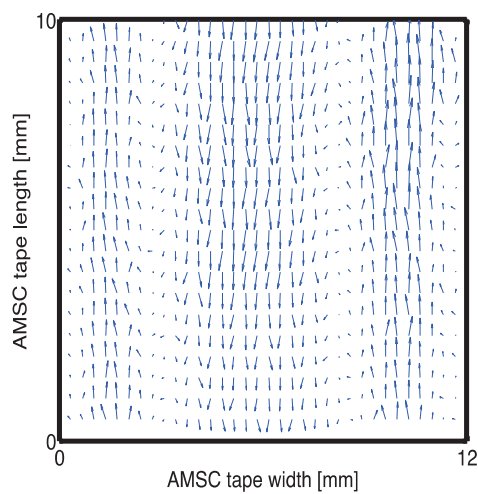


Fig. 2-17. Two-dimensional residual current density profiles in AMSC tape.

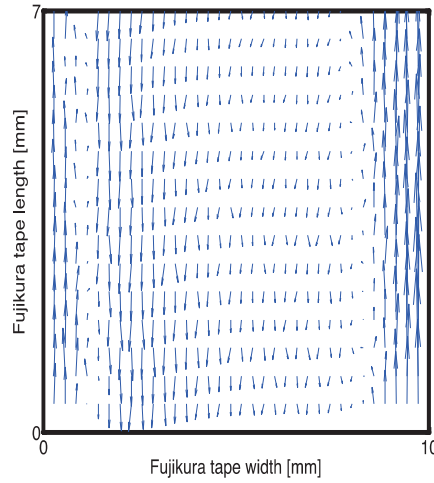


Fig. 2-18. Two-dimensional residual current density profiles in Fujikura tape.

2.3.5 Conclusion

Three components of self-magnetic field and corresponding 2D residual current density profiles for three types of HTS tapes are demonstrated in this paper.

For the BSCCO tape, the inhomogeneity of the current density profiles and the self-magnetic field profiles would show the performance of the HTS tape. We observe the fact that the 3D magnetic field scans are not the same along the tape (See Fig. 2-12). In fact, B_z amplitude changes in 1 cm part of the BSCCO tape. That predicts an inhomogeneity of current distribution in this tape, which was operated under transport current equal to half the critical one before current switch off.

In Fig.2-16 the 2D residual current density distribution shows a high density of superconducting filaments at the center and two directions of the current. One direction is via the tape's edges and the second direction via the tape's center. The residual current density at the edges is not symmetric that proves that the density of the superconductor filaments is not equal. Therefore one BSCCO edge has higher number of superconductor filaments density. This fact can indicate a deflection of the BSCCO tape observed in the 2D residual current density distribution. On the other hand, the residual current flow at the center is not parallel to the tape's length direction. The superconductor filaments inside the BSCCO tape might be then not parallel to the BSCCO longitudinal direction due to fabrication procedure. We can observe in Fig. 2-16 a vortex-like structure inside the BSCCO tape.

For the YBCO tapes, the 3D self-magnetic field scans are almost the same along the tape longitudinal direction, indicating a high homogeneity. We show in Figs. 2-13 and 2-14 the B_y components of the AMSC tape self-magnetic field and the B_z components of

Fujikura tape self- magnetic field.

In the 2D residual current density profiles shown in Figs. 2-17 and 2-18 we observe also two directions of the current via tape's edges and center. For the AMSC tape, the residual current density at the edges is almost symmetric along the X direction and penetrates to the tape's center (see Fig. 2-17). However for Fujikura tape, the residual current density profiles are not symmetric along edges (see Fig. 2-18). Residual current shows lower penetration to the Fujikura tape's center comparing to the wider AMSC tape. The critical current of Fujikura tape is more than five times higher than the transport current, before switch off, comparing to the critical current of AMSC tape, which is three times higher than the transport current (See Table. 2-2).

To study current density homogeneity we calculated the residual current density for each BSCCO and YBCO tapes corresponding to each longitudinal position. We can conclude that the homogeneity of the HTS tapes may depend on the magnitude of the applied current, processes of manufacturing, critical current and tape's width.

References

- [1] M. Tallouli, J. Sun, O. Shyshkin, A. Ninomia, M. Hamabe, H. Watanabe, N. Chikumoto, S. Charfi Kaddour, S. Yamaguchi, "Residual Magnetic field measurement of BSCCO and YBCO tapes by a Hall probe," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol 25, No. 3, 2015.
- [2] M. Carrera, X. Granados, J. Amoros et. al., "Current distribution in HTSC tape obtained by inverse problem calculation", Journal of Physics: Conference Series 234 (2010) 012009.

2.4 強磁性材料を用いた積層導体の臨界電流特性

中部大学では、超伝導直流送電用ケーブルの臨界電流の向上を目指してケーブル構造の研究を進めている。超伝導直流送電を社会に適用するためには安価で高性能なケーブルが必要とされる。大電流のケーブルを作るためには、線材は多層構造にする必要がある。本年度は、積層された超伝導テープ線材の周りに強磁性材料を配置することにより、通電電流により発生した線材周りの磁場を整形し、臨界電流を改善する。実験では超伝導テープ線材の臨界電流の特性を測定した。

表 2-3 は測定する線材及び用いた強磁性材料の仕様である。DI-BSCCO(HT-CA)を適切な長さに切断し、2本及び6本の線材を作成し、3本の電圧タップを半田で線材に接合した。線材はカプトンテープを一層毎に巻き付け絶縁している。図 2-19 に2本及び6本の積層導体の構造、強磁性材料の配置方法を示し、図 2-20 に通電実験方法を示す。積層導体を液体窒素に浸し、二つ電源を用いて通電方式を変え、強磁性材料の隙間 (d) を変化させ、77K

の温度下で四端子法を用いてテープ線材の臨界電流測定を行った。

表 2-3 測定する線材及び強磁性材料の仕様

Items	DI-BSCCO	FMS
Thickness (mm)	0.35	0.30
Width (mm)	4.5	3.0/5.0
Length (mm)	270	150
Ic (s.f. 77 K)	200 A	-
Type	HT-CA	-

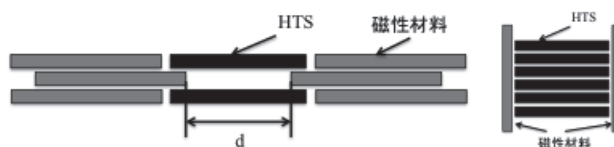


図 2-19 2層（左）と6層（右）積層導体の強磁性材料の配置方法

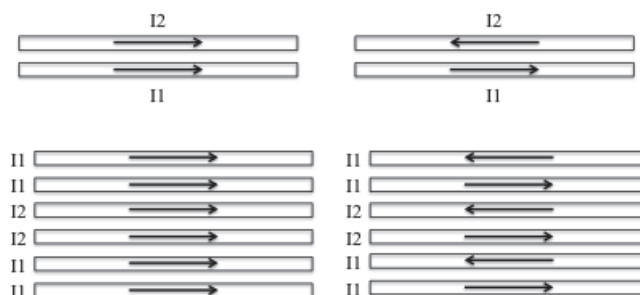


図 2-20 2層と6層積層導体通電方式 左：同方向；右：逆方向

図 2-21 左に強磁性材料の有無による二層積層導体の BSCCO（図 2-19 左）の臨界電流の測定結果を示す。横軸は臨界電流を測定する線材に隣接する線材に通電した電流 I であり、縦軸は自己磁場中の単一の線材の臨界電流に対する臨界電流増加率である。横軸では、同方向通電(↑)の場合を正電流とする(図 2-20 左)。負電流は逆方向通電(↓)を示す(図 2-20 右)。200A 級 BSCCO 線材の積層構造の場合、通電方向に対して臨界電流が異なる傾向を示す。臨界電流は違方向通電をすると増加するが、同方向になると線材単体の臨界電流値に比べて大幅に減少することがわかる。強磁性材料を用いると、同方向通電した場合の臨界電流の減少を抑えることができ、逆方向通電をすると $d=2\text{mm}$ において 30%以上臨界電流が増加した。

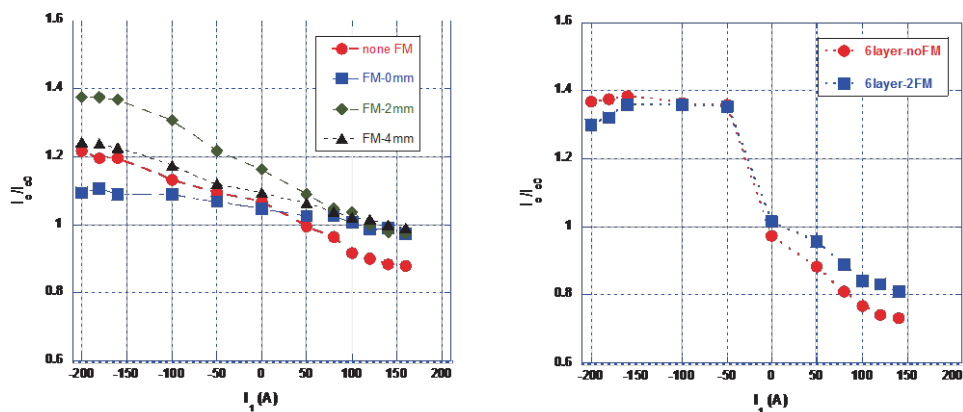


図 2-21 左：強磁性材料を用いた 2 本積層導体の臨界電流測定結果
右：強磁性材料の影響による 6 本積層導体の臨界電流測定結果

図 2-21 右に強磁性材料有無による六層積層導体の BSCCO(図 2-19 右)の臨界電流の測定結果を示す。臨界電流は違方向通電の場合は増加するが、同方向になるとテープ線材単体の臨界電流値に比べて大幅に減少することが分かる。特に強磁性材料を用いると、同方向通電の場合、臨界電流の減少を抑えことできた。逆方向通電をすると 30%以上の臨界電流の増加が観測されたが、強磁性体の有無による依存性は少なかった。

第3章 平成23年度～26年度成果のまとめ

本章において、過去4年間の研究の主な成果をまとめる。詳細は付録の論文集を参照されたい。

3.1 200m級超伝導直流送電実証実験装置での実験

3.1.1 冷凍循環試験

3.1.1.1 はじめに

2010年に完成した200m級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)を用いて、私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」プロジェクトの期間中3回の冷却試験を行った(プロジェクト以前の試験を合わせると通算6回)。試験期間は以下の通りである。

第4回：2011年8月17日より10月31日

第5回：2012年8月20日より11月6日

第6回：2014年6月10日より12月25日

ここで、第4回から第6回までのCASER-2を用いて行った冷却試験についてまとめる。

3.1.1.2 CASER-2システムの改修

冷却試験の進展に従い、様々な技術的な改良点が見つかり、又、新たなアイデアを盛り込むためにCASER-2システムの改修を行った。2011年4月以降に行ったシステムの改修についてまとめる。

A) 第4回冷却試験前

冷凍機のコールドヘッドの温度計位置を変更し、コールドヘッドにSIを施工した。冷凍機に真空計を設置した。循環ポンプのSIの施工をし直した。冷凍機システムの上下に屈曲していた配管をなるべく直線状になるよう配管の取り回しを変更した。端末BにおいてP型ペルチェ電流リードを新設計の物に取り替えた。端末間に差圧計を取り付けた。

B) 第5回冷却試験前

両端末の内部にアクセスが容易になるように、端末の鏡板を取り外し可能な構造に改修した。端末AにGM冷凍機を取り付け、端末A出口に液体窒素の仕切板を取り付けた。端末Bのケーブル固定具を改良した。又、断熱配管に遮熱塗料を施工した。

C) 第6回冷却試験前

冷凍機システムについて配管の引き回しを全体的に見直した。上タンクの圧力が直接循環ポンプ入口にかかるように配管の引き回しを変更した。循環ポンプのインペラーを大

流量対応の物に変更した。

3.1.1.3 断熱配管の熱侵入量測定

断熱配管の入口出口の温度差と流量より、断熱配管 175m での熱侵入量を見積もった。図 3-1 に今まで測定した断熱配管での熱侵入量の測定結果を示す。外管の温度に依存して熱侵入量が変化し、外管温度 5°Cにおいて熱侵入量 260W が測定された。第 1 回と第 2 回の間、熱侵入量の減少は断熱真空の排気システムの改修による。第 2 回と第 3 回の冷却試験の間の熱侵入量の減少は配管自体の改修を行い、SI 施工の変更などを行ったことによる。その他にも、夏季の昼間の熱負荷をカットするために配管に遮熱塗料を塗装し、効果を確認した。

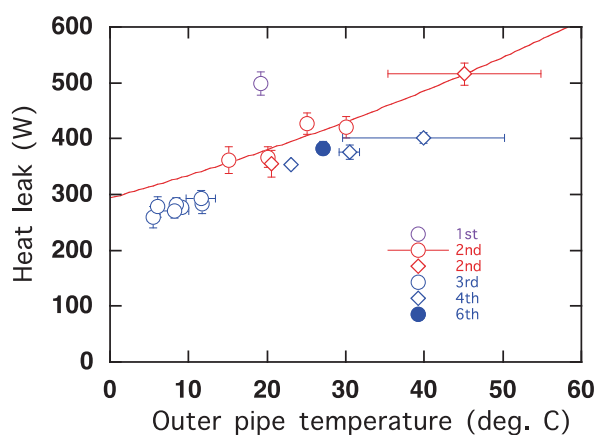


図 3-1 断熱配管の熱侵入量

3.1.1.4 端末の熱侵入量評価

端末の入口出口間の液体窒素の温度上昇と流量より、非通電時・通電時の端末での熱侵入量評価を第 4 回冷却試験において行った。結果を図 3-2 に示す。この測定では電流リードからの熱侵入だけでなく、端末容器での熱伝導、輻射による熱侵入も含めて評価している。端末一台あたり非通電時に約 210W、1000A 通電時約 240W の熱侵入量が測定された。

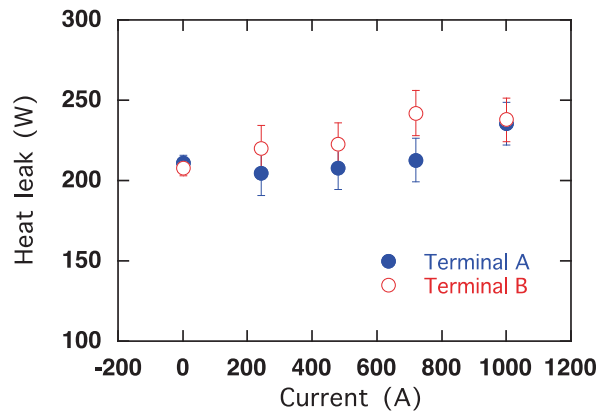


図 3-2 端末での熱侵入量

3.1.1.5 液体窒素の循環試験

両端末間での液体窒素の圧力差を測定することにより、断熱配管 200m での循環による圧力損失を測定した。結果を図 3-3 に示す。第 6 回の冷却試験の前に循環ポンプのインペラーと配管の取り回しを改修することにより、システムの最大流量を 16L/min から 31L/min へ増加させることができた。断熱配管部分の圧力損失は流量とともに増加し、31L/min で 12kPa であった。5L/min 以下では熱サイフォン効果により圧力損失が負となる現象が観測された。第 6 回の循環試験において、循環ポンプを停止しても熱サイフォン効果により 2L/min 程度で循環が維持可能なことを確認した。

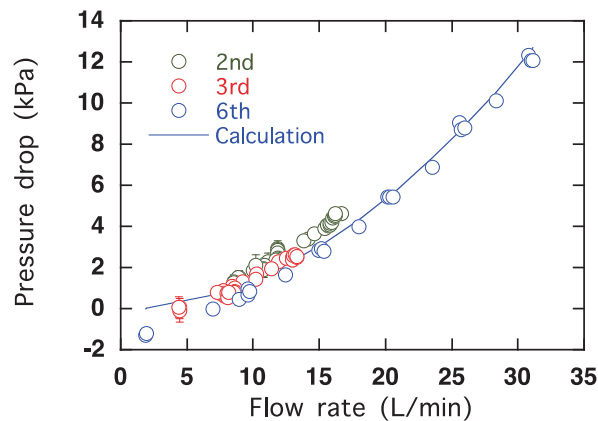


図 3-3 断熱配管 200m あたりの圧力損失

3.1.1.6 通電試験

第 5 回冷却試験において約一ヶ月間、最大電流 1200A で長期通電試験を行い、安定してシステムを運用可能であることを確認した。第 6 回冷却試験において、ケーブルに最大 3.6kA 通電を行うことによりケーブルの最大通電可能電流の測定を行うと共に、導体間を電

流が渡り合う（分流する）様子を測定した。図 3-4 に外導体について臨界電流の測定結果を示す。外導体が 16 本なのに対し、内導体は 23 本のため、ケーブルの最大通電可能電流は外導体の臨界電流により決まる。最大通電可能電流は $1 \mu \text{V/cm}$ の基準で 3.22kA であった。

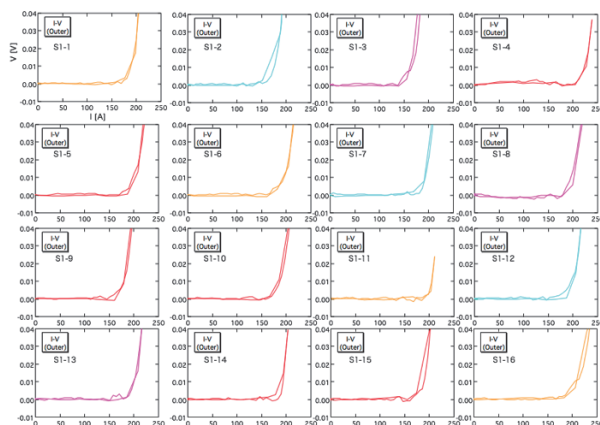


図 3-4 外導体における 3.6kA 通電時の I-V プロファイル

CASER-2 のケーブルでは導体は絶縁されていない。B 端末側を正極とし外導体の 16 本の導体を電源に接続し、A 端末側を負極とし外導体の 1 本の導体を電源に接続し通電を行った。始端と終端において導体を流れる電流を測定することにより、電流が導体間をどのように渡り合うかを調べた。結果を図 3-5 に示す。図より各導体に流れていた電流が導体間を渡り合うことにより 1 本の導体に集約される様子がわかる。

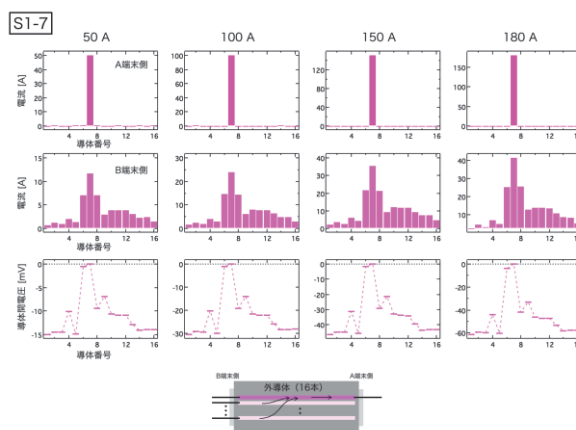


図 3-5 外導体間を電流が渡り合う様子

3.1.1.7 X 線によるケーブル像の撮影

各冷却試験前後において、昇温中と冷却中の断熱配管内の超伝導ケーブル像を X 線により撮影した。昇温中と冷却中でケーブルは配管内で位置を変化させ、熱収縮分の伸び縮み

を吸収していることが分かった。昇温中は曲部では冷却前は曲がりの外側、冷却中は曲がりの内側に位置を変えていた。又、直線部分では冷却中ケーブルは直線状なのに対して、昇温中はヘリカル状に変形していることが明らかになった。図 3-6 に第 4 回冷却試験後の昇温後に撮影した写真から求めた断熱配管の中心軸に対してのケーブルの変位量を示す。青が水平方向、赤が垂直方向、横線が管壁を表すが、昇温後、ケーブルは配管中でヘリカル状になっていることが分かる。

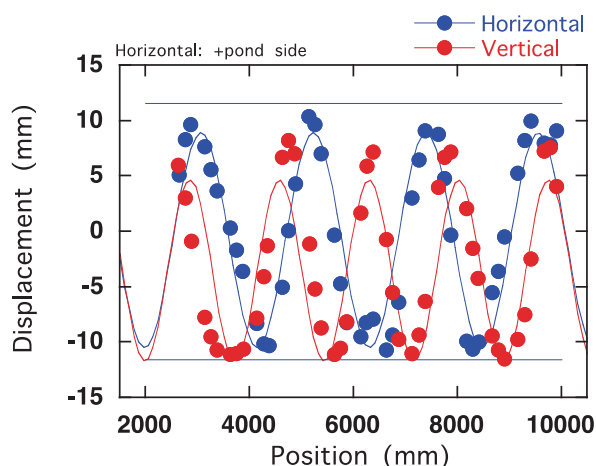


図 3-6 昇温中のケーブルの断熱配管中での位置

3.1.1.8 冷凍機システム

冷凍機の冷凍能力、循環ポンプの Q-H 特性などの性能評価を行った。その結果を元に冷凍機システムの改修を行なった。当初、循環ポンプの吐出圧 0.03MPa、流量 16L/min で頭打ちであったのが、第 6 回冷却試験の前に行った冷凍機システムの大幅な改修により最大 0.11MPa、31L/min 程度まで増加させることができた。図 3-7 に改修後の第 6 回冷却試験中に行った循環ポンプの Q-H 特性及び軸動力特性の測定結果を示す。

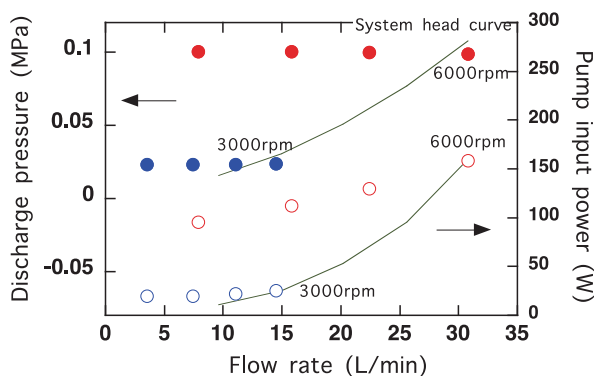


図 3-7 循環ポンプの Q-H 特性及び軸動力特性

3.1.2 サーマルサイフォン実験

Industrial application of HTS cables for power transmission is largely constrained by the imperfection of the cryogenic pumps which are expensive apparatuses providing additional heat load. The density of cryogen changes from point to point because it naturally heats up while flows through the cryogenic channel accumulating heat load. Therefore, a low hydraulic resistance and sufficient level difference will lead to a natural circulation. Ideally, HTS power transmission line may not contain a cryogenic pump. This approach can reduce the cost of the system making it more simple and stable. The feasibility of the given approach was confirmed theoretically for various system configurations. Experimental verifications were carried out using 200-meter DC HTS facility at Chubu University (see Fig. 3-8) during 3rd, 4th, and 6th cooling tests.

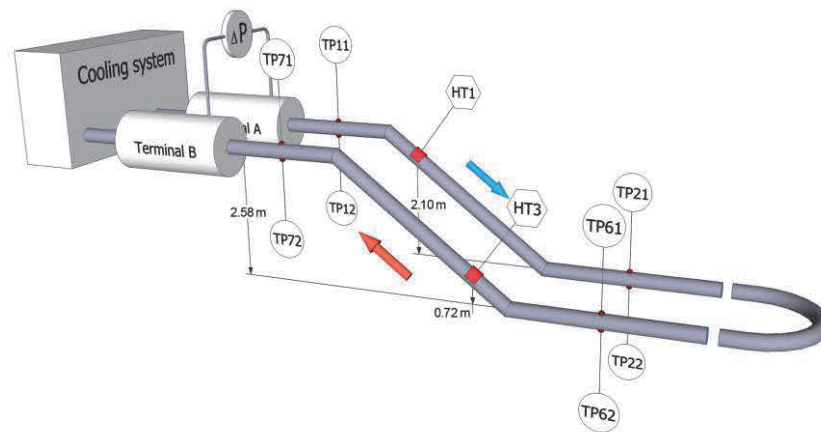


Fig. 3-8 Sketch of the 200 m DC HTS cable facility at Chubu University. Only terminal units, cryogenic pipes, differential gauge (ΔP), selected thermometers (TP) and heaters (HT) are shown in the picture. Level difference is 2.58 m.

Three series of experiments were performed. First, the experimentally obtained pressure drop versus effective temperature difference behavior at flow rate of about 8 L/min obviously show the presence of thermosiphon effect which is in the qualitative agreement with the theory. Second, before the 4th cooling test the facility was upgraded with the installation of a new differential gauge to improve accuracy of the measurements. The quantitative agreement between the experimental data and the theory was noticed at flow rate of about 6 L/min. It was very important that the overall pressure drop between terminals vanished at a certain artificial heat load. Third, final measurements were performed during 6th cooling test in 2014. The experiments began with the liquid nitrogen flow rate of about 11 L/min. After a short-time preheating of

the liquid nitrogen, cryogenic pump was turned off. Decaying positive oscillations of the flow rate were observed. In the longest experiment, the steady state at 2 L/min was achieved after about 40 min. The experiment lasted more than 6 hours without accidents, and then the cryogenic pump was started again. The maximum outlet temperature was 80.3 K. Although the liquid nitrogen level difference was rather small, the effect was strong enough to keep HTS cable temperature at an acceptable level. Brief information about the experiments is summarized in Table 3-1.

Table 3-1. Brief information about experiments

Cooling test	Flow conditions	Results	Publication
3rd	7.9 L/min (forced circulation)	Effect was observed qualitatively	Y. Ivanov et al. Observation of the thermosiphon effect in the circulation of liquid nitrogen in HTS cable cooling system. // Phys. Procedia, vol. 27, 2012, pp. 368-371
4th	5.9 L/min (forced circulation)	Effect was observed quantitatively; zero pressure drop was achieved	Y. Ivanov et al. Thermosiphon effect during cooling test of a 200 m DC HTS cable facility. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016 (accepted)
6th	2.0 L/min (natural circulation)	Pure natural circulation was observed	Y. Ivanov et al. Thermosiphon effect during cooling test of a 200 m DC HTS cable facility. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016 (accepted)

3.2 接続部の抵抗のばらつきによる偏流と交流損失

At present, it is clearly seen a shift from the AC superconducting cables to the possessing higher usability and efficiency DC ones. Ideally, in DC HTS cable there are no hysteresis and other losses native to AC, which significantly reduce the efficiency of the power transmission line and complicate the design of HTS tapes and cables. However, the current fluctuations as because of the harmonics generated by AC/DC converters (rectifiers), and because of change in the load operating modes are superimposed on DC. These fluctuations produce AC loss. The spectrum of the ripple

current depends on the type of rectifier. When discussing AC cables made of many HTS tapes, significant attention is paid to the current imbalance. The analysis is carried out by taking into account self- and mutual inductances. In the case of DC cables, the resistances define the current distribution. Each end of the tape is connected to the output terminal or to the connecting bus. It is technically feasible to make the resistance of these solder joints sufficiently low. Furthermore, manufacturer-supplied HTS tapes have randomly distributed splices. Although the splices' resistances are very low, but against the background of zero resistance of HTS they define the individual currents in the tapes. The current through the tape with splice becomes non-vanishing only when the current through the parallel tape without splice approaches the critical value and the tape becomes resistive. Obviously the longer the tape (cable), the stronger the influence of the resistive state, and current imbalance will be suppressed. In the presence of this nonlinearity ripple current causes the occurrence of additional higher harmonics. Therefore, AC losses in the DC HTS power cable are distributed in a complicated manner. A clear picture of the current imbalance is given in Fig. 3-9.

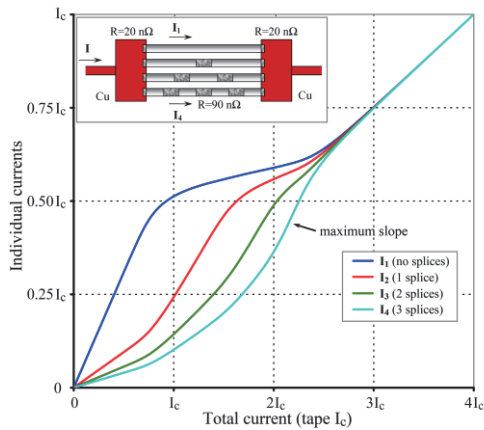


Fig. 3-9 Direct current imbalance in four HTS tapes.

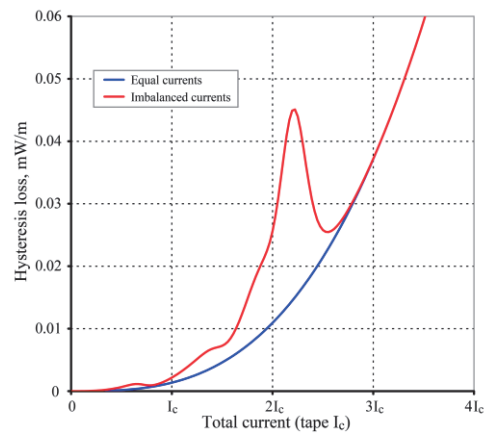


Fig. 3-10 Hysteresis loss obtained by different approximations.

Total hysteresis loss per unit length of the DC cable made of N tapes can be obtained by summing all of the tape losses at all corresponding frequencies. Amplitudes of the harmonics at the output of the rectifier should be corrected to take into account the non-linearity of the cable “transfer characteristics”. Fig. 3-10 shows the AC loss in the same four-tape cable in the approximations of equal and imbalanced currents in the

worst case of 6-pulse rectification. Rated frequency is 60 Hz. Calculations using imbalanced currents model reveal pronounced peak of AC loss at about 0.5-0.6 (cable I_c) and weak peaks at the lower currents. If we consider similar 450 m 2.5 kA DC cable made of 20+20 HTS tapes with 0-3 splices each, the hysteresis loss at operating current is about 0.30 mW/m, but at lower current of 2 kA it is 0.45 mW/m.

3.3 断熱 2 重管の熱侵入量測定

断熱 2 重管における熱侵入量低減方法を検討するために、横置き型熱侵入量測定装置とテスト配管を用いて、様々な実験条件において断熱 2 重管での熱侵入量の測定を行った。計測機器の測定精度の検討を行った後、多層断熱材(MLI)や配管材料や断熱真空の真空度が熱侵入量に与える影響を調査した。結果を図 3-11 に示す。配管の材料や MLI の施工の有無や真空度が熱侵入量に影響を与えることが分かる。又、MLI の層数や端部の重ね合わせの方法を変更するなど MLI の施工方法を変更し、熱侵入量の測定を行い、結果を評価することにより、より良い MLI の施工方法を検討した。その検討結果を元に石狩プロジェクト用断熱配管の MLI 施工方法を決定したが、石狩プロジェクト用テスト配管を用いた熱侵入量の評価テストでは内管二本への合計で 0.73 W/m (石狩プロジェクトの断熱配管は循環のため行きと帰りの二本の内管を持っている。第 1 章参照) という結果を得ている。

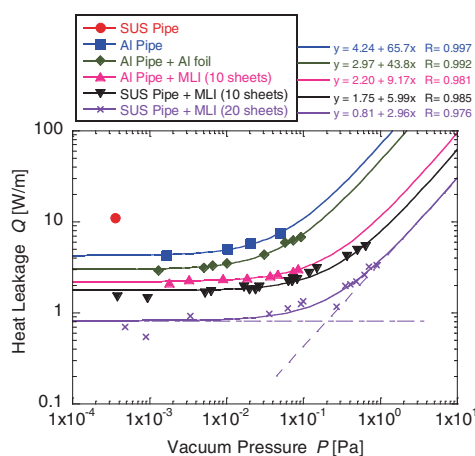


図 3-11 MLI の施工、配管材料、断熱真空の真空度に対する熱侵入量の依存性

3.4 ペルチェ電流リード (PCL) の特性評価

直流超伝導送電システムを実用レベルで競争力を持った製品に位置づけるためには、運転コストの低減が重要な課題となる。超伝導直流送電では、電気抵抗はゼロだが、冷却・保持に大型冷凍機システムを常時稼働させる。冷凍機の冷却効率は通常 0.1 以下と低いので、

大規模な送電システムの低コスト化には高い断熱性を持つ機器の開発が必要となる。

超伝導送電システムの端末部には、室温環境と低温環境を貫いて電流が行き来する接続部分として「電流リード」がある。通常、この部分には電力ロスを小さくするために電気抵抗の小さい良導体（通常金属）が用いられる。しかし、電氣的な良導体は一般に熱的にも良導体なので、大きな熱侵入経路となってしまう。そこで、熱電効果の一種であるペルチェ効果を利用し、積極的に熱エネルギーを外部へ汲み出す機能を備えたペルチェ電流リード（PCL）を開発した。PCL の性能評価にはカスタムメイドのテストベンチを開発・作製し、超伝導直流送電システムのために開発された各社製 PCL の性能を評価した。テストベンチの概略図を図 3-12 に示す。PCL にはペルチェ素子としてビスマス=テルル化合物からなる半導体が用いられている。

テストベンチを用いて試料各部の温度および温度差、発生電圧を測定した。熱侵入量の電流依存性、電流値で規格化した（PCL 1 本あたりの）侵入熱量を求めた。一対あたりの熱侵入量としては、低電流領域で一旦減少傾向を示し、50 A 付近に極小値を示したあと、電流を増大させると熱侵入量は増大していく傾向があった。規格化した熱侵入量の結果から、システム設計として最適な電流値とそのときの全電流量に対する kA あたりの熱侵入量を求めた。測定した複数の電流リードについて、最適電流は 100-140A、熱侵入量は約 30W/kA であった（第 1 章図 1-4 参照）。さらに、これらの結果に基づいて PCL の特性を解析的に分析し、熱流束の制御特性をさらなる改善を目指す計画とした。

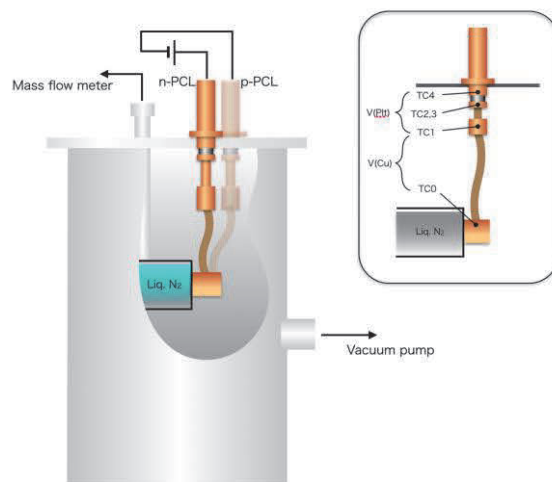


図 3-12 PCL の性能評価実験に用いたテストベンチの概略図と測定端子の配置図

3.5 高電流化を目指した積層導体の臨界電流特性評価

超伝導直流送電用ケーブルの臨界電流の向上を目指してケーブル構造についての基礎研究を行った。大電流容量を得るために超伝導ケーブルは多層構造となっているが、一般的

に臨界電流は磁場とともに減少することが知られており、多層導体の場合には隣接する導体による磁界の影響を受ける。そこで、まず臨界電流に対する導体の積層方法および通電方向による影響を調べた。具体的には、平行配置した隣接する導体間のギャップの大きさによる影響、積層の仕方による影響、積層導体における通電方向の影響等を調べた。検討例を図3-13に示すが、例えばc) とd) は積層数は同じであるが、臨界電流はd) の上から3層目の導体において1.5倍以上に向上することが見出された。

その他の条件についても、いずれも相互の導体において自己磁場の影響を打ち消すような条件で導体を配置あるいは電流の向きをかえることにより、臨界電流が向上することを見出した。

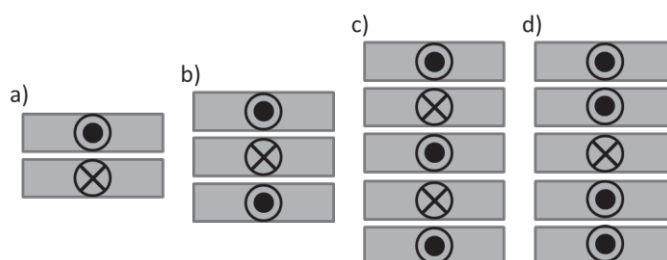


図 3-13 積層した導体の通電方向の影響検討例

また、図3-14のように強磁性体を線材の近くに配置して自己磁場の低減化をはかり、臨界電流への影響を調べた。その結果、適当な間隔 d で強磁性体を配置することにより、臨界電流の向上がみられることがわかった。

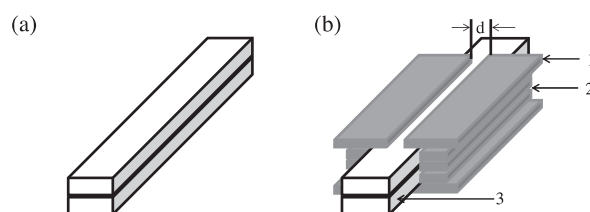


図 3-14 強磁性体の影響の検討 (a) 2層積層導体 (b)強磁性材料の配置例

3.6 過電流通電時および電流遮断後テープ線材の電流分布特性評価

超伝導ケーブルシステムのシステム設計のためには、過電流通電や電流遮断後の超伝導素線の特性把握が必要である。そこで、ホール素子を用いた二次元及び三次元の磁場分布測定装置を開発し、各種線材について過電流通電時、あるいは電流遮断時の磁場分布測定を行った。また、Biot Savart法則の逆問題を解くための数値ソフトウェア開発をおこない、それを用いた解析をおこなった。

図 3-15 に過電流プロファイルを示すが、過電流実験のときには、このようなプロファイ

ルの電流を流したあと、電流遮断をおこない、1A/s で徐々に電流をあげた場合（通常条件）と比較をおこなった。例として図 3-16 にそれぞれの線材端部で測定した磁場の時間依存性を示す。過電流条件と通常条件では YBCO 線材にはほとんど差はないものの BSCCO は全く振る舞いが異なることを見出した。

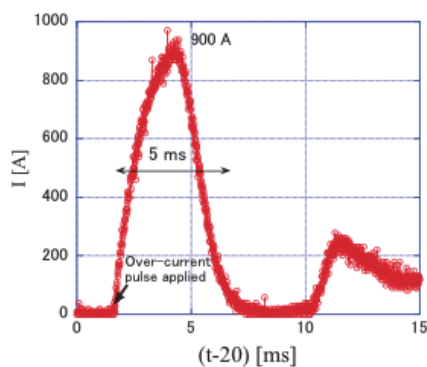
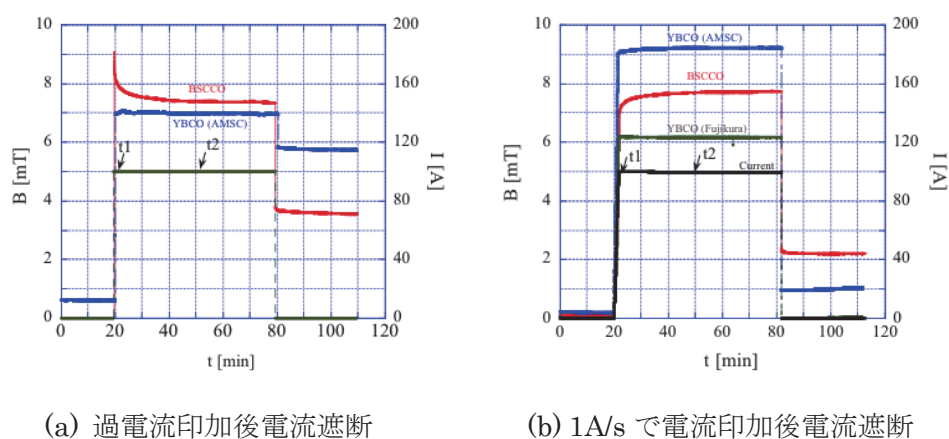


図 3-15 過電流パルス波形

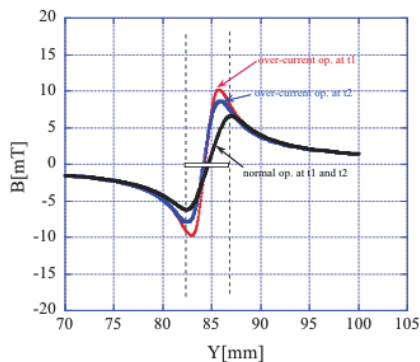


(a) 過電流印加後電流遮断

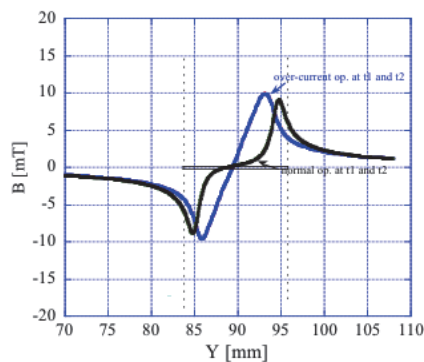
(b) 1A/s で電流印加後電流遮断

図 3-16 過電流印加後電流遮断および 1A/s で電流印加後電流遮断したときの線材端部で測定した磁場の時間依存性の比較

また t1、t2 時の磁場分布測定結果を図 3-17 に示す。BSCCO テープでは過電流条件において、t=t1 と t2 で磁場分布が大きく変化したのに対し、通常条件では t1 と t2 でほとんど変化していない。一方、Y 系テープではどちらの場合も時間変化がないことがわかった。



(a) BSCCO テープ



(b) AMSC 社製 Y 系テープ

図 3-17 過電流条件 (Fault current op.) および通常条件 (Normal op.) 時の磁場分布の比較

3.7 直流太陽電池システムの開発

太陽電池(PV)の出力は直流で、商用周波数の交流に変換してから家庭や系統へ送電される。家庭や工場のほとんどの機器は、交流を直流に変換して使用している。何度も電力変換器を通ることでコストと損失が増大するために、電力変換器を減らして電力の効率的な利用を考えることが有効である。データ・センター(iDC)については、米国では 2005 年頃から直流化が検討され、日本でも NTT を中心に iDC の直流化が実験されている。大型 iDC の消費電力は 50 MW 程度とされ、それを DC400 V 程度で給電することになっている。このため、電力系統に流れる電流は 125 kA にもなる。このような直流大電流の通電は超伝導が得意とする。

市販 PV は、2 種類に分類される。一つはシリコン系の PV で単結晶系と多結晶系、もう一つは CIS 系(Cu-In-Se を利用した太陽電池)である。大きな違いは一つのパネルの出力電圧である。それぞれ 2 kW 購入して試験を行った。図 3-18 に PV モジュールの外観を示す。太陽が強く照っている時に、短い時間で負荷を変えることにより電流を大きく変えたときの電圧変化や、電気ヒーターへの通電時の電圧変化等の特性を調べた。また、PV に鉛蓄電池を接続し、機器の電力供給を安定化する「エネルギーの平準化」を実験した。太陽光発電での発電電力は、太陽光の入射角、天候、季節などの様々な要因でその発電量が大きく変化する不安定性がある。発電エネルギーを安定的かつ長期的に利用するには発電エネルギーの平準化が必要である。蓄電池電圧の監視により、AC200V 系統との直流連系を可能にし、365 日・24 時間の負荷への無停止電力供給を可能にする。

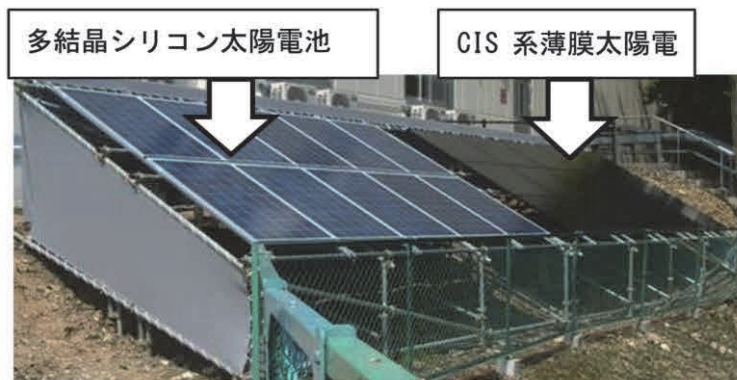


図 3-18 太陽電池モジュールの外観

3.8 低温電力変換器の特性

超伝導直流送電システムでは、超伝導ケーブルの冷却のために多量の低温寒剤（液体窒素）を使用する。この低温寒剤を有効利用のために、本研究では、電力変換器に使用されるパワー半導体デバイスの低温での特性変化を検討した。

一般に半導体のバンドギャップの大きさは低温になるほど大きくなることが知られている。そのため、Si をダイオードに用い、低温中で使用した場合には、バンドギャップの幅が広がるため、逆方向バイアスの場合では耐電圧が上昇することが期待出来る。逆に順方向バイアスの場合では順方向電圧は上昇すると推測される。そこで、まず各種ダイオード、MOS-FET、LED などの素子について、窒素冷却による影響を調べた。表 3-2 に Si ダイオードについての結果をまとめるが、Si ダイオードの順方向電圧の温度特性では全てにおいて、常温時に比べて液体窒素中で順方向電圧が上昇した。また、降伏電圧の温度特性においても、常温時に比べて液体窒素中で耐電圧が減少した。また SiC ダイオードや Ge ダイオードにおいても液体窒素中で順方向電圧の上昇がみられた。

表 3-2 Si ダイオードの液体窒素中と常温での順方向電圧および降伏電圧

型番	順方向電圧			降伏電圧		
	常温 (V)	LN ₂ 中 (V)	差 (V)	常温 (V)	LN ₂ 中 (V)	差 (V)
1N4001	0.70	1.050	0.350	1960	1540	-420
GP20G	0.65	1.050	0.400	1200	800	-400
RM2A	0.65	1.050	0.400	1150	850	-300
10DL2CZ47A	0.50	1.000	0.500	281	242	-39

さらに V_{DSS} が異なる 3 種類のパワー-MOS-FET 素子 (表 3-3) について、室温および液体窒素に素子を浸漬した状態での各種特性の比較をおこなった。その結果、いずれの場合にも ON 電圧の低下がみられた。そのほか、耐電圧特性、ゲート充放電電流測定、周波数特性試験、スイッチング+On 電圧損失 (素子損失) 試験等を行った。

表 3-3 特性試験に用いたパワー-MOS-FET 素子の諸元

型番	メーカー名	定格： V_{DSS}	定格： $I_D(DC)$
2SK3432	NEC	40V	83A
75NF20	ST	200V	75A
2SK1020	FUJI Electric	500V	30A

また低温動作する電力変換器の開発に必要な構成要素となる半導体素子、コンデンサ、OP アンプ、変換器等の液体窒素中動作試験をおこなった。試験結果から、低温動作電力変換器の開発にあたって、液体窒素環境で動作可能な電子デバイスは以下の通りであることを確認した。

- ① コンデンサ：フィルム型コンデンサのみ使用可能
- ② 抵抗：炭素被膜、金属被膜など抵抗器は全般的に使用可能
- ③ シリコン系トランジスタ、ダイオード：使用できないか、できても損失が大きい
- ④ フォト素子：特性を吟味したうえで使用可能
- ⑤ デジタル IC：C-MOS は動作可能 (TTL, HC は不可)
- ⑥ オペアンプ：C-MOS オペアンプは動作可能
- ⑦ 基準電圧素子：TL431 など精密基準電圧素子、三端子は使用不可能である。ツェナーダイオードは素子に明記された電圧からシフトした値で動作可能
- ⑧ パワー素子のトランジスタ、IGBT は使用不可能であるが、MOS-FET は ON 電圧の低下というメリットもあり、使用可能である。

3.9 半導体材料の加工

超伝導直流送電システムには、直流-交流間の電力変換をおこなう電力変換器が必要不可欠である。電力変換器には半導体デバイスが利用され、変換器の高速化・低損失化・大容量化に対応するために次世代パワー半導体として SiC などの開発が進められている。しかしながら、SiC は、ダイヤモンドに次ぐ高硬度でかつ脆い難加工材料である。そこで、本研究では、SiC を半導体素子として利用、電力変換器応用を推進するため、SiC の新しい加工方法としてワイヤ放電加工法の開発をおこなった。具体的には、加工の高速化並びに低損失化のため、加工時に用いる加工液の検討をおこなった。その結果、従来用いていたイ

オン交換水をフッ素系溶液に変えることで、図 3-19 に示すようにフッ素系溶液では加工面粗さが大幅に低減化されることを見出した。また、加工における損失の低減も確認できた。

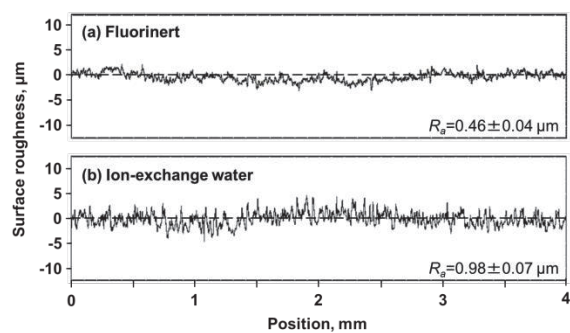


図 3-19 フロリナートおよびイオン交換水を加工液とした場合の加工面粗さ

第4章 まとめと展望

本節では中部大学超伝導センターの200m ケーブル実験装置 (CASER-2) の実験についての全体的なまとめを行うと同時に、超伝導ケーブルの応用について再度検討する。具体的には、本プロジェクトが始まってから新たな応用先として検討が始まった「航空機応用」である。これは、昨年10月にJAXAから予算がついて検討が始まったが、実質的には文部科学省からの予算で建設された実験装置などを多用し、研究が行われている。つまり、本予算が母体になり、新しい応用が進んだと言える。また、実用化の展望として現在検討を進めている社会実装について、ここでまとめてみる。特に第1章では詳しく触れなかったLNG冷熱利用について、もうすこし詳細に述べる。

4.1 CASER-2 実験まとめ

2010年に完成した200m級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)を用いて私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「低炭素化社会のための超伝導直流送配電システムの研究開発」プロジェクトの期間中3回の冷却試験を行った。

断熱配管での熱侵入量の測定を行い、外管温度5°Cにおいて175mあたり約260Wという値を得た。又、端末での熱侵入量の測定を行い、非通電時約210W、1000A通電時約240Wという値を得た。

液体窒素の循環試験を行い、液体窒素循環による圧力損失測定を行った。31L/min時、200mで12kPaの圧力損失が発生した。又、低流量域で熱サイフォン効果による圧力損失が負になる現象を観測した。熱サイフォン効果により循環ポンプを止めた状態で2L/min程度の流量で循環が維持できることを確認した。

最大1200A通電で約一ヶ月の長期通電実験を行い、安定してシステムを運用できることを確認した。ケーブルの最大通電可能電流の測定を行い、1μV/cmの基準で3.22kAまで通電可能であることを確認した。通電中に電流がどのように導体間を渡り合うか測定した。

冷却中、昇温中のケーブル像をX線を用いて撮影することにより、断熱配管中でのケーブルの状態を調べた。ケーブルは冷却中は縮み、長さが決まった断熱配管中で可能な最短距離を通るよう位置を変位させ、昇温中は伸び、最長距離を通るよう位置を変位させていた。特に、昇温中はケーブルはヘリカル状に変位することによりケーブルの伸びを吸収していた。

冷凍機システムの性能評価を行い、冷凍機の冷凍能力、循環ポンプのQ-H特性と軸動力の測定を行った。評価結果を元に冷凍機システムの改修を行った。改修により循環ポンプの吐出圧0.11MPa、流量31L/minでの実験を行うことが可能となった。

4.2 航空機での超伝導給配電ケーブルについて

航空機での電力利用が急速に進んでいる。現在の動向は圧縮空気、油圧、メカ（機械系）などでの補助動力を全て電力に置き換えることを目標に進んでいる。航空機の重量と消費電力の関係を図 4-1 に示す[1]。

- Huge increase in the rating of the electrical power system
 - Up to 10 times more electrical power with MEA

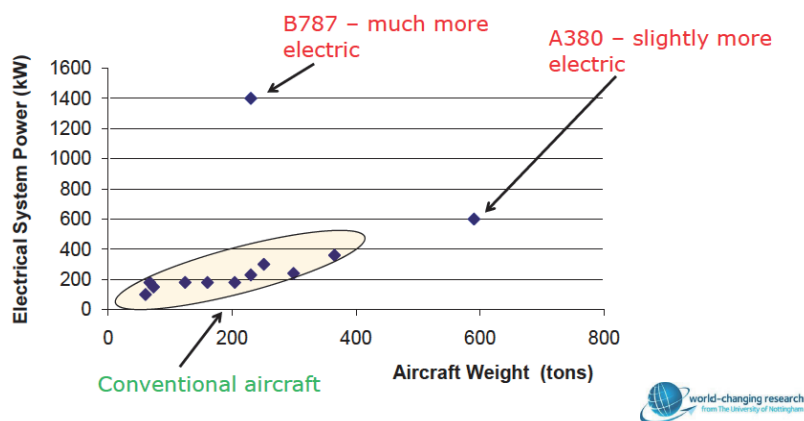


図 4-1 航空機重量と使用電力の関係[1]

電力利用が大きく進んだ最近の例ではB787であり、同規模の従来の航空機に比べて自重当たり10倍近い電力が使われ、その結果省エネルギー化が進み、結果として燃費が大きく改善された。この動向をMEA (More Electric Aircraft)と呼んでいる[2]。そして、最終的にはエンジンも電動化し、電気モータ推進システムが目標になっていて、Airbus, Boeing など欧米メーカで具体的な超伝導モータの検討が始まっている。これをEA (Electric Aircraft)と呼んでいる[3]。また、リチウムイオン二次電池電源の2人用小型航空機もAirbus社で生産工場が完成し、ドーバー海峡を横断すると同時に量産も始まっている。図4-2に日本で設計された一例を示す。

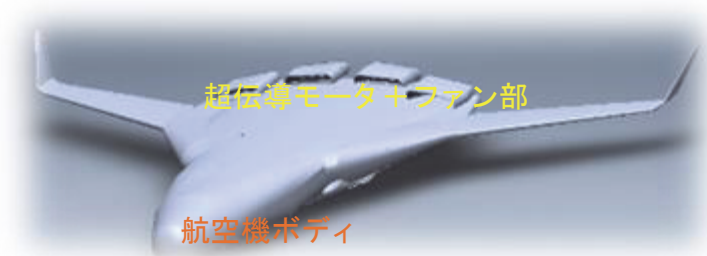


図 4-2 次世代航空機形状と超伝導モータ[4]

この例では、超伝導モータがファンを駆動して飛ぶことになっている。従来の設計に比べて下記の点が大きく異なる。

- 1) 翼の上に接して推進部を設置し、空力特性を改善する
- 2) 従来は推進力を得るためのエンジンは2基から4基程度が翼下に装着されたが、10基以上を搭載する。このため、一基当たりのモータ出力は小さい

そして、最終的には図4-2に見られるように機体形状も従来から大きく変わっている。これは、燃料として液体水素を利用するため胴体体積を大きくすることも目指している。

一方、航空機はアースが原理的に取れないので、大電力利用では低電圧・直流利用が望ましい。そして、軽量化が優先事項である。このため、超伝導の特長である低電圧・大電流が得意で、小型化ができることを念頭に超伝導応用が検討されている。また、地球温暖化防止対策の一環として、炭酸ガス排出が少ないエンジンの開発が望まれ、水素燃料が検討されている。

炭酸ガスを排出しない燃料電池（FC）を自動車に用いるシステムの開発が現在精力的に行われている。そして、FCを航空機に応用する実験も別途同時並行で進んでいる。水素を液体水素で貯蔵すると温度は20K程度になるので、この冷熱を利用できれば航空機に冷凍機を持ち込む必要がない。冷凍機は一般には重く、消費電力も大きいので合理的な選択である。また、液体水素を燃料として利用するので、気化熱も温度保持に利用できる。配電ケーブルの断熱も地上で利用する超伝導ケーブル等に比べて容易と思われる。つまり、飛行時間程度液体水素があれば良く、その時間は2時間程度からせいぜい1日程度であるためである。また、FCのエネルギー効率は、一般にはガスタービンに比べて高いので、FCを航空機の補助動力装置として利用すれば小規模な液体水素タンクから開発を進めることになり、航空機への搭載は超伝導モータの完成を待たずしてMEA段階で超伝導技術が利用可能になると思われる。特に、FCは通常の発電機に比べて重量当たりの出力が大きいことも航空機への応用を考えると好ましい。そして、ガス化した水素をFCで利用するだけでなく、余ればジェットエンジンで利用してもよいであろう。以上をまとめて、現在検討中のシステム構成[5]を図4-3に示す。

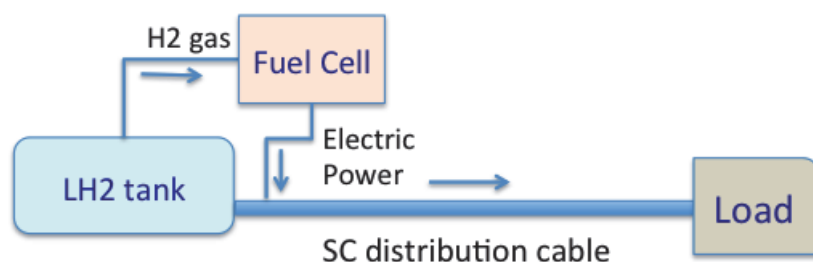


図 4-3 液体水素、燃料電池及び超伝導配電系[5]

配電ケーブルはバスバー構造とし、主に 3 つの部分からなる。一つはクライオスタットであり、もう一つは導体部である。それに端末部（低温と常温部を接続するターミナル部分）である。これらは、航空機の直流バスバーは重量を下げることを優先しながら、従来行われてきた電力送電用のケーブル[6]に比べて、低電圧で比較的短い距離での利用のため、これらの条件に合わせてケーブル設計・試作を進める必要がある。具体的には、従来のクライオスタットは主にステンレスで作られていたが重量が嵩む。一方、FRP を使ったヘリウム用のクライオスタットも市販されていて、これは液体水素用クライオスタットでも利用可能であり軽い。このため、試作ではクライオスタット材料は有機材料が主な複合材料を使うことにした。但し、一般に有機物は熱収縮率が大きく、金属の収縮率とは異なるので、複合構造に大きな熱応力が発生しないように材料・構造を決める必要がある。

一方、導体部は従来から研究開発を進めてきた積層往復導体[7]を利用することにした。これは従来の超伝導直流ケーブルに比べて、電流密度で 10 倍ほど高く、従来の超伝導ケーブルに比べて大幅に軽量/小型になり、元の線材の臨界電流よりかなり高くなり、配線が容易になる特長もある。図 4-4 に超伝導バスバー（積層導体及び断熱 2 重管）の断面模式図を示す。

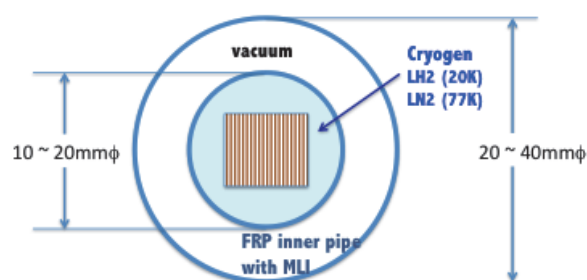


図 4-4 航空機用超伝導バスバーの模式断面図[7]

試作では Bi-2223 テープ線材を使う予定であり、液体窒素温度（77K）での臨界電流は 200A 程度ある。したがって、液体窒素温度（20K）では、臨界電流は 1kA を越すと思われる。単位長さ当たりのテープ線材自重は 13g/m 程度であるため、単位長さ&電流当たりの重量はしたがって、線材だけであればオーダとして、

$$\sim 0.01\text{g/m/A}$$

となる。この値は銅ケーブルの 1/100 以下である。試作では、これを 6 本束ねて積層往復導体として利用する予定である。尚、テープ線材の断面は 4.5mm 幅で 0.35mm 厚であり、最初の装置は長さが 2m ほどを予定している。

一方、これに電源及び負荷を接続する部分は電流リードと言い、ここから常温側に電流を取り出す。一般に銅の常温での電流密度は $1 \sim 3\text{A/mm}^2$ 程度で設計するため、定格電流を

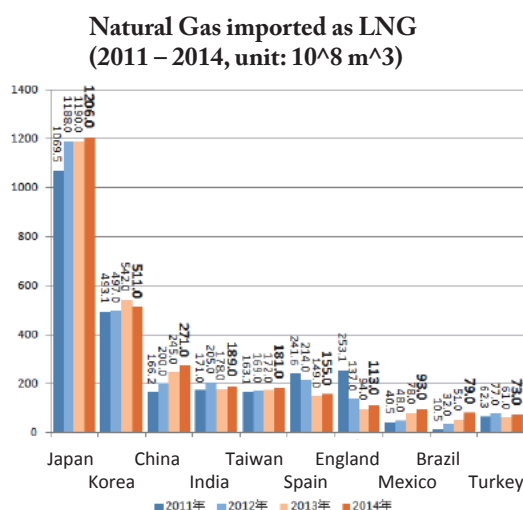
3kA の往復導体とすると、必要な銅導体断面積は、

$$2000 - 6000 \text{ mm}^2$$

となる。これは 45mm 角～77mm 角の断面となり、上記の超伝導テープ線材の断面積に比べて著しく大きく、重いことが分かる。この様な研究が元となり、航空機の超伝導応用が進み、日本の産業の高度化が進むことを願っている。

4.3 LNG 冷熱利用及び超伝導送電システムのコストについて

2011 年 3 月の震災及び原子力発電所の事故以来日本では液化天然ガス（LNG、メタンが主成分）の輸入が増えている。図 4-5 に主要国の 311 震災以降の LNG 輸入状況を示す。



<http://www.garbagenews.net/archives/1967830.html>

図 4-5 世界の LNG 輸入主要国と輸入量

LNG を多用する傾向は、米国のシェールガス革命もあり、世界的な潮流であり、これから 100 年にわたり続くと言われている。また、この図を見ると、日本が世界一の輸入国であるが、同時に韓国、中国、インドなどアジアの主要国の輸入が多い。これは天然ガス生産地から遠く離れているため、液化してタンカーで輸送する事が社会経済的に合理的な選択である。一方、ヨーロッパではロシアからの輸入が多く、陸上輸送になるため、液化しないでパイプラインで送られている。そして、ドイツの輸入量は日本の 70%ほどである。昨年度の報告書に書いたが、ガスパイプラインでの輸送は LNG 輸送に比べて輸送コスト（LNG プラント及び輸送時に使われるエネルギー）が 1 桁近く大きいので、日本のように周りが海に囲まれている国は天然ガス生産地から遠く離れていても大きな問題にならないだけでなく、メリットが大きい。但し、この状況は日本が輸入する LNG が安価であることを意味しない。

さて、LNG タンクは大気圧で使われるため温度は 112K 程度である。したがって、現在汎用の高温超伝導線材の利用は不可である。しかしながら、同じ圧力での液体窒素温度との温度差は 40K 程度である。したがって、この冷熱を利用することは超伝導応用を進める上で重要となる。実際、大気から液体窒素や酸素、アルゴンなどを分離する空気分離機では LNG 冷熱を利用すると冷凍機の消費電力が大幅に低減できるので（数分の 1 になる）、多くの国で空気分離機の LNG 冷熱利用は一般的になっている。これは、超伝導システムを液体窒素温度で冷却するシステムでは冷凍機の高温度側を LNG 温度にすることに対応し、冷凍機 COP を著しく高め（0.1 程度から 0.6 程度と大きくなる可能性がある）、冷凍機は小型になる。これは、超伝導システムの経済性を抜本的に改善する。特に、第 1 章に書いたように低温系への熱侵入量の低減を想定する場合には極めて重要になる。文献[8]では電流リードからの熱侵入量の低減について検討を行っている。そして、現在の～50W/kA の熱侵入量が 1.4W/kA 程度のみで下がる可能性を数値的に示している。これは目標値（=25W/kA）より著しく低く、実用化を大きく進める。

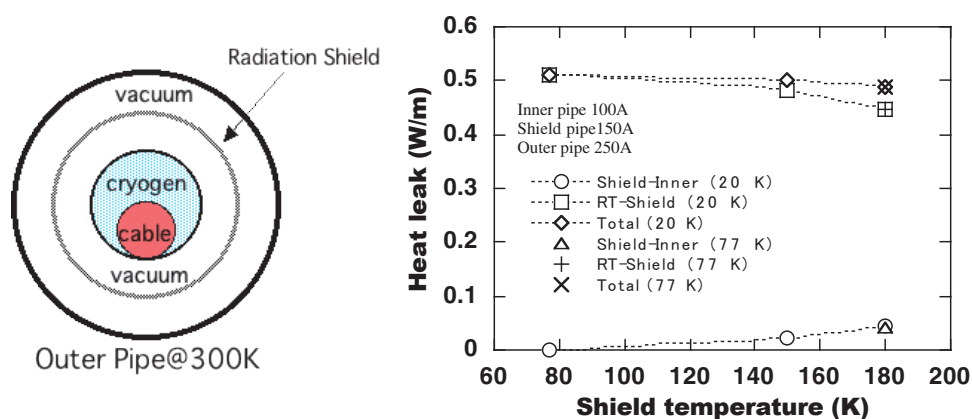


図 4-6 色々な温度での輻射シールドと 77K 系への熱侵入量[9]

一方、断熱 2 重管の熱侵入量の低減について下記のように検討した。図 4-6 に検討構造と熱侵入量の結果[9]を示す。図左は断熱 2 重管断面構造を示し、中心の配管に超伝導ケーブルが納められている。この温度は液体窒素を利用するとして 77K 及び液体水素を利用するとして 20K を仮定している。また、大きさは 100A とした。そして、その外側に輻射シールドがあり、この温度は LNG 等の別冷媒で温度が固定されている。サイズは 150A である。そして、最外層は断熱 2 重管外管であり、サイズは 250A であり、温度は 300K とした。図右は、横軸が輻射シールドの温度であり、縦軸は熱侵入量であり、超伝導ケーブルが納められている配管への熱侵入量の他に輻射シールドへの熱侵入量も計算している。計算は輻射について行われ、輻射率は中部大での 200m ケーブル実験装置の値を利用している。

このような同軸構造での輻射によるエネルギー輸送については、解析式[10]もあるが、ここでの計算は有限要素法による数値計算を用いた。輻射だけによるエネルギー輸送の計算のため、内管などの支持構造物が含まれていないので、低温系への熱侵入量の合計が 0.5W/m ほどになっていることがわかる。これは現状 MLI の性能である。

さて、これから超伝導ケーブル配管への熱侵入量は温度が 77K, 20K ではそれほど変わらないことが分かる。これは輻射によるエネルギー輸送が温度の 4 乗に比例するため、常温付近の温度に比べて十分に低いためである。そして、輻射シールド温度が 150K 程度であっても超伝導ケーブル配管への熱侵入量は 0.1W/m より低いことが分かる。この値は第 1 章で次の段階の目標値とした値である。つまり、LNG 冷熱を利用すれば、現状の MLI 及び断熱 2 重管構造で到達できる可能性が高い。

一方、LNG は可燃性のため、大電力機器と一緒に利用することは技術的や法規制的に難度が高いと思われる。この問題を避ける一つのアイデア[9]を図 4-7 に示す。不燃性及び難燃性の冷媒に熱交換器で冷熱を移すのである。

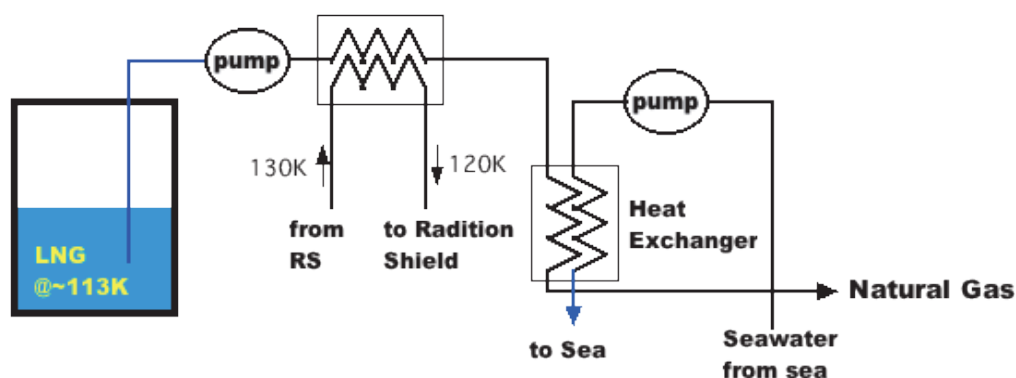


図 4-7 LNG 冷熱を利用するための熱交換器系[9]

このような方策がうまく働けば、超伝導ケーブル応用は当初の技術目標値に到達し、冷凍機を大きく削減できるのでコスト的にも優位となり、社会実装を進める上で極めて有望になるだろう。

最後に、現時点までに到達している超伝導ケーブルのコストについて概観する。2015 年 8 月 18 日の日本経済新聞一面に日本に送電線を導入する記事が書かれていて、建設コストは 10 億円/km と記載されている。これについては、別途、幾つかの会社へのインタビューを通じて、ほぼ、この程度のコストになっていることの裏付けも取れている。一方、石狩プロジェクトは開発費を入れて 40 億円国費が投入され、2 回線合計で 1.5km のケーブルシステムが完成した。これには R&D 費用も含まれている。このため、もし 1 回線なら 2km

は建設可能であろう。このため、大凡のコストとして 20 億円/km と見積もることができ
る。このため、長さ当たりでコスト評価を行うと架空線に比べて 2 倍程度の違いになって
いる。したがって、100km ほどの建設を行う事になると、大量生産の効果等によって架空
線と同程度になる可能性がある。そして、地中埋設を高速道路や国道などに沿って行くと、
地権者が極めて限られる。一方、架空送電線では鉄塔を建てる地権者との交渉に長い時間
が必要になるため、最終的なコストは同等になる可能性もあろう。特に、架空線では法規
制が広範囲に及び日本では 18 もの法律の許認可が必要になるが、国道や高速道路に埋設す
る場合には 5 つほどの許認可で済む。現時点では、大規模に高速道路に埋設するには、立
法措置が必要になるであろうが、今後の社会実装に合わせて検討する事項であろう。そし
て、この状況はヨーロッパなどでも共通である。

またコストについては、石狩プロジェクトでは 20kV と電圧が低いので、電流的には同等
であるが送電電力は少ない。したがって、現在のシステムをすぐにと言うことにはならな
いが、この問題はケーブルの電気絶縁電圧を上げることで対応することになるので、安全
設備や周辺機器のコストは上がるが、ケーブル自身のコストはそれほど上昇しない。一方、
超伝導ケーブルは地中に埋設するのが一般的である。銅、アルミケーブルでも地中埋設す
る事ができるが、地中では架空線に用いられる裸線に比べて冷却が大きな課題になり、電
流密度を低くする運転となりコスト高になる。このため、近い将来地中埋設が求められる
場合には超伝導ケーブルが一番安価になる可能性がある。

以上のような状況であるため、第 1 章では技術的な課題を述べたが、送電システム全体
として実証実験を行う段階に来ており、その中でコストを見積もる必要があろう。尚、交
流ケーブルとの比較などについては、文献[11]を参照にされたし。

文献

- [1] Jon Clare, "Example of More Electric Aircraft Research in the Aerospace Research Center", Univ. of Nottingham.
- [2] 岡井敬一, 渡辺紀徳, 「航空機エンジン電動化に向けた現状と展望」日本ガスタービン学
会誌, Vol. 42, No. 1, p. 24 (2014).
- [3] 岡井敬一, 渡辺紀徳, 「航空機エンジン電動化の最新研究状況」日本ガスタービン学会誌,
Vol. 43, No. 1, p. 184 (2015).
- [4] 東大・岡井敬一、JAXA・小島孝之、田口秀之氏の好意による
- [5] 山口作太郎ほか, 「航空機での超伝導応用の可能性について-配電ケーブル」, 低温工
学超電導学会 2015 年秋期講演会, p. 106, 2B-p04.

- [6] S. Yamaguchi, H. Koshizuka, K. Hayashi, T. Sawamura, “Concept and Design of 500 meter and 1000 meter FC Superconducting power cable in Ishikari, Japan”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, 25(2015)1.
- [7] J. Sun et al, “Critical current distributions of BSCCO tapes in the multi-layer HTS conductors”, *Physics Procedia*, 36(2012) 1290.
- [8] S. Yamaguchi, M. Emoto, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Yu. Ivanov, J. Sun, N. Yamamoto, A. Iiyoshi, “A proposal of multi-stage current lead for reduction of heat leak”, *Physics Procedia*, 27(2012) 448-451.
- [9] S. Yamaguchi, H. Watanabe, Yu. Ivanov, V. Vyatkin, N. Chikumoto, M. Emoto, “Proposal for an actual reduction of heat leak of HTS cable system using Liquid Natural Gas (LNG)”, IWC-HTS, Matsue, Japan, Oct. 2015, submitted to Cryogenics.
- [10] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, “Transport Phenomena”, p. 453, John Willy & Sons, Inc., 1960.
- [11] 山口作太郎, 「高温超伝導ケーブルの現状と将来」工業材料 2016年1月号, p. 38.

研究業績一覧

論文・総説等 61 件

1. H. Watanabe, Y. Ivanov, M. Hamabe, N. Chikumoto, T. Kawahara, H. Takano, and S. Yamaguchi, "Circulation Test of Liquid Nitrogen for Long Superconducting DC Power Transmission Lines", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 3, 5400504 (2016)
2. Y. Ivanov, V. Vyatkin, H. Watanabe, N. Chikumoto, M. Hamabe, J. Sun, H. Takano, S. Yamaguchi, and E. Otabe, "Current Imbalance and AC Losses of Long Distance DC HTS Cable", IEEE Transactions on Applied Superconductivity
3. Y. Ivanov, H. Watanabe, N. Chikumoto, M. Hamabe, H. Takano, J. Sun, and S. Yamaguchi, "Thermosiphon effect during cooling test of a 200 m DC HTS cable facility", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, No. 3, (2016)
4. M. Tallouli, J. Sun, O. Shyshkin, M. Hamabe, H. Watanabe, N. Chikumoto, S. C. Kaddour, S. Yamaguchi, "Study of 2D residual current density profiles of BSCCO and YBCO HTS tapes by means of 3D Hall probe system", IEEE Transactions on Applied Superconductivity
5. H. Ohara, J. Sun, M. Hamabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, "Critical Current Enhancement of BSCCO Tapes in Stacked Conductors with Ferromagnetic Sheets", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, (2015), 8000404
6. M. Tallouli, J. Sun, O. Shyshkin, A. Ninomia, M. Hamabe, H. Watanabe, N. Chikumoto, S. C. Kaddour, S. Yamaguchi, "Residual Magnetic Field Measurement of BSCCO and YBCO Tapes by a Hall Probe", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3 (2015), 8000704
7. M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, T. Kawahara and S. Yamaguchi, "Long term operation in 200 m class superconducting DC power transmission test facility in Chubu University", Journal of Physics, 11th European Conference on Applied Superconductivity 2013(EUCAS2013), Vol.507, 032020, (2014)
8. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, "Critical current measurement of HTS tape relating with cable structure for a DC power cable", Journal of Physics, 11th European Conference on Applied Superconductivity 2013(EUCAS2013), Vol.507, 022038, (2014)
9. H. Watanabe, Y. Ivanov, M. Hamabe, N. Chikumoto, T. Kawahara, S. Yamaguchi, K. Itaka, Y. Furuya, H. Kojima, "Development of the superconducting DC power transmission system for the renewable energy", Grand Renewable Energy 2014 (GRE2014), 2014/7/28, 東京ビックサイト, P-Pe-3-5, (2014)
10. N. Yamamoto, S. Yamaguchi, T. Kato, "Effects of machining fluid on electric discharge machining of SiC ingot", Materials Science Forum Vol. 778-780, pp.767-770, (2014)

11. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, M. Tallouli, S. Yamaguchi, “Cooling experiments of the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2”, Book of Proceedings Tunisian-Japanese Symposium on Society, Science and Technology (TJASSST2013), Session III : Energy and Materials, pp.22-25, (2014)
12. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, N. Yamamoto, T. Kawahara, S. Yamaguchi, “Critical current behavior of a BSCCO tape in the stacked conductors under different current feeding mode”, Physica C: Superconductivity, Vol. 494, 15 November 2013, pp.297-301,(2013)
13. H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, “Evacuation time of cryogenic pipes for superconducting power transmission”, Physica C: Superconductivity, Vol. 494, 15 November 2013, pp.292-296,(2013)
14. T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, S. Yamaguchi, Y. Okamoto, Y. Ogata, T. Mashimo, “Developments of Functional Graded Thermoelectric Materials using SiGe under a strong gravitational field”, Proceedings of 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013/6/5, Nagoya, Japan, 2013-h-25p,(2013)
15. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, M. Minowa, “Development of a Peltier Current Lead for 200-m-class Superconducting Direct Current Transmission and Distribution System”, J. Electron. Mater., Vol. 42, pp.2337-2342, (2013).
16. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, “Effects of HTS Tape Arrangements to Increase Critical Current for the DC Power Cable”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, No. 3, 5401104,(2013)
17. M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, “Status of a 200-Meter DC Superconducting Power Transmission Cable After Cooling Cycles”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity , Vol. 23, No. 3, 5400204, ,(2013)
18. S. Yamaguchi, M. Emoto, N. Yamamoto, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, and T. Kawahara, “Refrigeration Process to Realize a Multistage and Gas-Cooled Current Lead”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 23, No. 3, 4802304, ,(2013)
19. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, Y. Ivanov, J. Sun, S. Yamaguchi, “Time dependence of terminals temperature with current feeding in the superconducting direct current transmission test device of CASER-2”, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, pp.723-726,(2012)
20. Y. Toki, M. Hamabe, Y. Ivanov, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, “Heat leak measurement of cryogenic pipe with vacuum insulation for DC superconducting power transmission”, Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, pp.719-722,(2012)

21. H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, M. Hamabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, "Thermomechanical Behavior of The Superconducting Cable of CASER2 at Chubu University", Proceedings of ICEC 24-ICMC 2012, Cryogenics and Superconductivity Society of Japan, pp.711-714,(2012)
22. N. Yamamoto, S. Yamaguchi, T. Kato, "Slicing of rotating SiC ingot by electric discharge machining", Materials Science Forum Vol.740-742, pp.843-846,(2012)
23. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi and S. Yamaguchi, "Critical current measurements of a tape in the hybrid multi-stacking high Tc superconducting tapes", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Vol.400, 022114,(2012)
24. T. Kawahara, H. Watanabe, M. Emoto, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, M. Minowa, "Current dependence of heat leak on the terminals in the superconducting DC transmission and distribution system of CASER-2", 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Vol.400, 052009,(2012)
25. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, J. Sun, S. Yamaguchi, "Design study of LN2 circulation in a long SC power transmission lines", Physics Procedia Vol.36, pp.1372-1377,(2012)
26. H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Heat leak measurement of the 200 m superconducting DC power transmission system at Chubu University", Physics Procedia vol.36, pp.1366-1371,(2012)
27. S. Yamaguchi, Y. Ivanov, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, M. Sugino, H. Yamada, "Experiment of the 200-meter superconducting DC transmission power cable in Chubu University", Physics Procedia Vol.36, pp.1131-1136,(2012)
28. J. Sun, S. Yamauchi, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Critical current distributions of BSCCO tapes in the multi-layer HTS conductors", Physics Procedia Vol.36, pp.1290-1295,(2012)
29. S. Yamaguchi, M. Emoto, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, N. Yamamoto, A. Iiyoshi, "A Proposal of Multi-stage current lead for reduction of heat leak", Physics Procedia Vol.27, pp.448-451,(2012)
30. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, M. Minowa, "Possibility of a gas-cooled Peltier current lead in the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2", Physics Procedia Vol.27, pp.380-383,(2012)
31. H. Watanabe, J. Sun, Y. Ivanov, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Cooling of the 200 m superconducting DC power transmission system at Chubu University", Physics Procedia Vol.27, pp.376-379,(2012)
32. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, S. Yamaguchi, "A new layout of HTS tapes and their critical currents for DC power cables", Physics Procedia Vol.27, pp.372-375,(2012)

33. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, J. Sun, S. Yamaguchi, "Observation of the thermosiphon effect in the circulation of liquid nitrogen in HTS cable cooling system", *Physics Procedia* Vol.27, pp.368-371,(2012)
34. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, Y. Ivanov, and S. Yamaguchi, "Optimization of Peltier Current Lead for Applied Superconducting Systems with Optimum Combination of Cryo-Stages", *AIP Advances in Cryogenic Engineering* Vol.57B, pp.1017-1024,(2012)
35. S. Yamaguchi, Y. Ivanov, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, and A. Iiyoshi, "The Experiments of 200-Meter Superconducting DC Power Cable in Chubu University and the Estimation for Longer Cable Cooling", *AIP Advances in Cryogenic Engineering* Vol.57B, pp.1959-1965,(2012)
36. T. Kawahara, M. Emoto, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun and S. Yamaguchi, "Thermoelectric Property Dependence on Performance of Peltier Current Leads under Overcurrent Conditions", *Journal of Electronic Materials*, vol. 41, No. 6, pp.1205-1209,(2012)
37. S. Yamaguchi, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, A. Iiyoshi, "Design and Construction of 200-Meter High Temperature Superconducting DC Power Cable Test Facility in Chubu University", *Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference International Cryogenic Materials Conference*, pp.1041-1047,(2011)
38. J. Sun, M. Emoto, K. Yoshimura, Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, "Development and operation of the measurement system for a 200 m HTS cable", *Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference International Cryogenic Materials Conference*, pp.1035-1040,(2011)
39. Y. Ivanov, H. Watanabe, T. Kawahara, M. Hamabe, S. Yamaguchi, "Superconducting Power Transmission Line Cooled with Naturally Circulating LN₂", *Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference International Cryogenic Materials Conference*, pp.1017-1022,(2011)
40. H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Evacuation Procedures of Long Cryogenic Pipes for Superconducting Power Transmission", *Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference International Cryogenic Materials Conference*, pp.649-652,(2011)
41. M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Y. Ishiguro, O. Shinshi, "High Accuracy Measurement of Heat Leak of Cryogenic Pipes for DC Superconducting Power Cable", *Twenty-Third International Cryogenic Engineering Conference International Cryogenic Materials Conference*, pp.639-643,(2011)
42. J. Sun, S. Yamauchi, M. Sugino, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Critical current measurements for design of superconducting DC transmission power cable", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 471, Issues21-22, pp.1313-1316,(2011)

43. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Circulation pump power for 200 m cable experiment", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 471, Issues21-22, pp.1308-1312,(2011)
44. H. Watanabe, M. Sugino, J. Sun, Y. Ivanov, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Cooling test of the 200 m superconducting DC transmission power cable system at Chubu University", *Physica C: Superconductivity*, Vol. 471, Issues21-22, pp.1304-1307,(2011)
45. T. Kawahara, T. Fujii, M. Emoto, M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, S. Yamaguchi, "Double Peltier Current Lead for Heat Leak Reduction at the Terminals for Superconducting Direct Current Applications", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, No.3, pp.1070-1073,(2011)
46. S. Yamaguchi, T. Fujii, M. Sugino, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, "Iron-Steel Cryogenic Pipe for DC Superconducting Power Transmission Line", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, No.3, pp.1046-1049,(2011)
47. M. Hamabe, M. Sugino, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, Y. Ishiguro, K. Kawamura, "Critical Current and Its Magnetic Field Effect Measurement of HTS Tapes Forming DC Superconducting Cable", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 21, No. 3, pp.1038-1041,(2011)
48. T. Fujii, S. Fukuda, M. Emoto, K. Osada, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, S. Yamaguchi, "Thermoelectric Property Dependence and Geometry Optimization of Peltier Current Leads Using Highly Electrically Conductive Thermoelectric Materials", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 40, No. 5, pp.691-695, (2011)

【総 説】

49. 山口 作太郎,「高温超電導ケーブルの現状と将来」,「工業材料」誌 2016 年 1 月号 Vol.64 No.1, pp.38-42 日刊工業出版プロダクション 2016 年 1 月
50. 筑本 知子,「エネルギースーパーハイウェイ(Energy super Highway)構想を目指して(研究室紹介)」, 超伝導 Web21, pp.39-40, 2014 年 4 月
51. 山口 作太郎,「世界をつなぐ超伝導直流送電」, 第 143 回 次世代産業ナビゲーターズフォーラム第 XV 期「新しい世界観」pp.58-73, 2013 年 10 月
52. 山口 作太郎、浜辺 誠、渡邊 裕文、ユーリ イワノフ,「石狩市でのデータセンターへの電力輸送一超電導直流ケーブル接続プロジェクト」, *Forum of Superconductivity Science and Technology(FSST) News*, No.139 , pp.2-6 一般社団法人未踏科学技術協会 2013 年 10 月 18 日
53. 山口 作太郎、渡邊 裕文,「超伝導ケーブル用の断熱 2 重管及び低温系について」, 超伝導 Web21, pp.28-29, 2013 年 6 月 3 日

54. 山口 作太郎,「石狩市で始まる超伝導直流送配電プロジェクト」, SUPER CONDUCTIVITY COMMUNICATIONS VOL. 22 No. 2, p1,pp. 5-7 超電導情報研 2013 年 4 月 26 日
55. 山口 作太郎、桃井 治郎、石原 範之,「日本の電力網の現状と超伝導直流送電導入」, SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol.21, No.5, 2012 年 10 月
56. 山口 作太郎、石原 範之,「ヨーロッパの電力網の紹介」, SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, Vol.21, No.4, 2012 年 8 月
57. 山口 作太郎、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男,「直流超伝導送配電システムの研究開発とその役割」, Forum of Superconductivity Science and Technology(FSST) News, No.134, pp.18-21, 一般社団法人未踏科学技術協会, 2012 年 7 月
58. 山口 作太郎,「科学技術の信頼性回復と超伝導(巻頭言)」, 未踏科学技術, No.456, pp.2-3, 2012 年 7 月
59. 山口 作太郎、河原 敏男,「核融合分野における熱電変換技術の応用」, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, Vol. 87, No. 12, pp.830-834, 2011 年 11 月

【著 書】

60. 山口 作太郎,「電力供給と再生可能エネルギーの普及」, 結晶 第 8 集 pp.190-192, 中部大学出版室 2014 年 10 月
61. 山口 作太郎,「第 6 章 第 1 節「超伝導機器の電流リード損失低減と熱電プロセスによる LNG 冷熱回収」,技術シーズを活用した研究開発テーマの発掘,pp.201-204, 技術情報教会出版, 2013 年発行

受賞(2件)

山口 作太郎、浜辺 誠, 超伝導科学技術賞「高温超伝導直流ケーブルシステムの先駆的研究」, 一般社団法人未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会
平成 24 年 4 月 17 日

筑本 知子,女性研究者研究業績部門「高温超伝導材料の高性能化に関する研究と直流送電応用」,応用物理学会 平成 28 年 3 月 19 日

特許(8件)

1. 山口 作太郎、渡邊 裕文(中部大学);「超伝導送電システムと冷却方法」,
特願 2013-138449 平成 25 年 7 月 1 日
2. 山口 作太郎(中部大学);「超伝導ケーブルと設置方法」,
特願 2014-509193 平成 25 年 4 月 3 日
3. 山口 作太郎(中部大学);「電流リード装置」,
特願 2012-538735, US 13/878,687, CN 201180048987.9,
DE11 2011 103 478.4 平成 24 年 10 月 14 日
4. 山口 作太郎、渡邊 裕文、孫 建(中部大学);「超伝導ケーブルとバスバー」,
特願 2012-546941 平成 23 年 12 月 1 日
5. 引地 康雄、菅根 秀夫、箕輪 昌啓(昭和電線ケーブルシステム株式会社)、山口作太郎、浜
辺 誠(中部大学);「電流リード」, 特許 5697161 平成 27 年 2 月 20 日
6. 引地 康雄、菅根 秀夫、箕輪 昌啓(昭和電線ケーブルシステム株式会社)、山口作太郎、浜
辺 誠(中部大学);「電流リード」, 特許 5697162 平成 27 年 2 月 20 日
7. 引地 康雄、菅根 秀夫、箕輪 昌啓(昭和電線ケーブルシステム株式会社)、山口作太郎、河
原 敏男(中部大学);「熱電冷却型電流リード」, 特許 5626593 平成 26 年 10 月 10 日
8. 山口 作太郎、渡邊 裕文(中部大学);「超伝導送電システム」,
特許 5780626, 平成 27 年 7 月 24 日
US 13/821,277, CN 201180053330.1, EP 11823682.7,
KR 10-2013-7007469, RU 2013115465 平成 23 年 9 月 5 日

学会発表 (130 件)

【招待講演】

1. S.Yamaguchi, Section: Superconductivity , Europe- Japan Symposium Electrical
Technologies for the Aviation of the Future(東京), 2015 年 3 月 26 日-27 日
2. S.Yamaguchi, “Superconducting Power Transmission line as the most efficient energy
transport”, World Sustainable Energy Forum - EnerSol WSEF Tunisia 2014(チュニジ
ア、チュニス), 2014 年 11 月 26 日-28 日
3. 山口 作太郎, 「高温超伝導直流送電は世界をつなぐ」, フロンティア 21 エレクトロニクスショー
(中部エレクトロニクス), 白鳥ホール, 愛知, 2014 年 10 月 21 日
4. 山口 作太郎, 「超伝導ケーブルの布設とその課題」, 電気設備学会 関西支部, 中央電気倶楽
部, 2015 年 2 月 2 日

5. S.Yamaguchi,“Long-distance energy transport through superconducting electric line_Asian Grid+”, 1st meeting of the Advisory Committee on the IASS program(ポツダム、ドイツ),2012年11月29日
6. S.Yamaguchi,“Experiment of the 200-meter DC superconducting power cable and Perspectives of DC Superconducting power transmission and distribution”, IASS Workshop(ポツダム、ドイツ), 2011年5月13日
7. 山口 作太郎,「直流超伝導送電は世界をつなぐ」, 和合ロータリークラブ, ホテルウェスティンナゴヤキャッスル, 2011年10月12日
8. 山口 作太郎,「超伝導直流送配電システムの可能性と材料開発」, ネオマテリアル創成研究会, 龍谷大学 アバンティ響都ホール, 2012年2月1日

【国際学会発表】

9. H. Watanabe,“Critical current measurement for design of HTS DC power cables”, 26th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference, New Delhi, India, (2016)
10. V. Vyatkin, J. Sun, Y. Ivanov, N. Chikumoto, H. Watanabe, O. Shyshkin, and S. Yamaguchi, “Dependence of DC HTS cable critical current on the temperature distribution along the cable”, International Symposium on Superconductivity, 東京・タワーホール船堀, (2015)
11. Y. Ivanov, V. Vyatkin, H. Watanabe, N. Chikumoto, M. Hamabe, J. Sun, H. Takano, S. Yamaguchi, and E. Otabe, “Current Imbalance and AC Losses of Long Distance DC HTS Cable”, International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Shanghai, China, (2016)
12. S. Yamaguchi, H. Watanabe, Y. Ivanov, V. Vyatkin and N. Chikumoto, “Proposal for an actual reduction of heat leak of HTS cable cryogenic system using Liquid Natural Gas (LNG)”, International Workshop on Cooling System for HTS Applications (IWC-HTS), 島根県松江市, くにびきメッセ, (2015)
13. K. Yamauchi, M. Ito, V. Vyatkin, Y. Ivanov, H. Watanabe, S. Miyata, N. Inoue and S. Yamaguchi, “Optimal current value evaluation test of Peltier current lead with water-cooled jacket”, International Workshop on Cooling System for HTS Applications (IWC-HTS), 島根県松江市, くにびきメッセ, (2015)
14. J. Sun , S. Miyata, K. Yamauchi, Y. Sato, Y. Zhang, M. Tallouli, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, N. Chikumoto, Y. Ivanov and S. Yamaguchi, “Cooling processes and current feeding tests on a 200-m DC HTS cable”, International Workshop on Cooling System for HTS Applications (IWC-HTS), 島根県松江市, くにびきメッセ, (2015)
15. H. Watanabe, M. Hamabe, N. Chikumoto, T. Kawahara, H. Takano, S. Yamaguchi, “Circulation test of liquid nitrogen for long superconducting DC power transmission

- line”, 12th European conference on applied superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (2015)
16. Y. Ivanov, H. Watanabe, N. Chikumoto, M. Hamabe, H. Takano, S. Yamaguchi, “Thermosiphon effect during cooling test of 200 m DC HTS cable facility”, 12th European conference on applied superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (2015)
 17. J. Sun, S. Miyata, S. Yamaguchi, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, N. Chikumoto, “Critical current and current feeding test of a 200-meter high temperature Superconducting DC power cable system”, 12th European conference on applied superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (2015)
 18. M. Tallouli, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, Y. Ivanov, T. Kawahara, S. Yamaguchi, E. Otabe, O. Shyshkin, S. C-Kaddour, “1 D and 2 D current and remnant current density profiles of BSCCO and YBCO HTS tapes by a 3 D Hall probe system”, 12th European conference on applied superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (2015)
 19. S. Miyata, Y. Yoshiwara, H. Watanabe, K. Yamauchi, K. Makino, S.A Yamaguchi, “Evaluation of Thermoelectric Performance of Peltier Current Leads designed for Superconducting Direct-Current Transmission Cable Systems”, 12th European conference on applied superconductivity (EUCAS2015), Lyon, France, (2015)
 20. S. Yamaguchi, A. Iiyoshi and H. Koinuma, “DC Superconducting Power Transmission Line as the most Efficient Energy Transport & A Proposal of Electric Transmission from Algeria to Europe”, The 5th Asia-Arab Sustainable Energy Forum & the 7th Int. Workshop on SSB, Tsukuba, Japan, (2015)
 21. T. Kawahara, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, M. Emoto, “6th Cooling experiments of the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2”, The 5th Asia-Arab Sustainable Energy Forum & the 7th Int. Workshop on SSB, Tsukuba, Japan, (2015)
 22. J. Sun, M. Tallouli, O. Shyshkin, M. Hamabe, H. Watanabe, N. Chikumoto, and S. Yamaguchi, “Residual magnetic field profiles and current density profiles of coated conductors for fast and slow cut-off current operations”, International Workshop on Coated Conductors for Applications 2014, Jeju, Korea, (2014)
 23. H. Ohara, J. Sun, M. Hamabe, S. Yamaguchi, “Critical Current of BSCCO Tape in the Stacked Conductors with Active Ferromagnetic Layers under Varying Current Feeding Mode”, International Symposium on Superconductivity, 東京・タワーホール船堀, SAP-43, (2014)
 24. Y. Ivanov, H. Watanabe, N. Chikumoto, M. Hamabe, J. Sun, H. Takano, and S. Yamaguchi, “Natural circulation of the liquid nitrogen in the cryogenic pipe of the 200 m DC superconducting cable facility”, International Symposium on Superconductivity, 東京・タワーホール船堀, (2014)
 25. M. Tallouli, J. Sun, O. Shyshkin, A. Ninomia, M. Hamabe, H. Watanabe, N. Chikumoto, S. C-Kaddour, S. Yamaguchi, “Residual magnetic field measurement of

BSCCO and YBCO tapes by a Hall probe”, Applied Superconductivity Conference2014, Charlotte Convention Center, USA, (2014)

26. H. Watanabe, Y. Ivanov, M. Hamabe, N. Chikumoto, T. Kawahara, S. Yamaguchi, K. Itaka, Y. Furuya, H. Kojima, “Development of the superconducting DC power transmission system for the renewable energy”, Grand Renewable Energy 2014 (GRE2014), 東京ビックサイト, (2014)
27. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, M. Tallouli, S. Yamaguchi, “Cooling experiments of the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2”, The Tunisia-Japan Symposium on Science, Society & Technology (TJASSST2013), Hammamet, Tunisia, (2013)
28. N. Yamamoto, S. Yamaguchi, T. Kato, “Effects of atmosphere medium in electric discharge machining of silicon carbide”, 12th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and nanostructures (ACSIN12), Tsukuba, Japan, (2013)
29. N. Yamamoto, S. Yamaguchi, T. Kato, “Effects of machining fluid on electric discharge machining of SiC ingot”, The International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2013 (ICSCRM2013), Phoenix Seagaia Resort, Miyazaki, Japan, (2013)
30. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, “Critical current measurement of HTS tape relating with cable structure for a DC power cable”, 11th European Conference on Applied Superconductivity(EUCAS), Genova, Italy, (2013)
31. M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, T. Kawahara and S. Yamaguchi, “Long period operation in 200 m-class superconducting DC power transmission test facility in Chubu University”, 11th European Conference on Applied Superconductivity(EUCAS), Genova, Italy, (2013)
32. T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, S. Yamaguchi, Y. Okamoto, Y. Ogata, T. Mashimo, “Developments of Functional Graded Thermoelectric Materials using SiGe under a strong gravitational field”, 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, (2013)
33. S. Yamaguchi, M. Hamabe, H. Watanabe, T. Kawahara, J. Sun, N. Yamamoto, J. Momoi and A. Iiyoshi, “Next Project of DC Superconducting Power Transmission in Chubu University”, 3rd Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Hirosaki, Japan, (2013)
34. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, “Cooling experiments of the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2”, 3rd Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Hirosaki, Japan, (2013)
35. H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, M. Hamabe, T. Kawahara and S. Yamaguchi, “Heat leak reduction of cryogenic pipe for ultra-long power transmission line”, World Sustainable Energies Forum (EnerSol-Wsef2012), Tunis, Tunisia, (2012)

36. S. Yamaguchi, J. Sun, N. Yamamoto, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, H. Kumakura and H. Kitaguchi, "Choice of high temperature superconductors of ultra-long power transmission line", World Sustainable Energies Forum(EnerSol-Wsef2012), Tunis, Tunisia, (2012)
37. S. Yamaguchi, M. Emoto, N. Yamamoto, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, "Refrigeration process to realize a multi-stage and gas-cooled current lead", Applied superconductivity conference2012, Portland, Oregon, (2012)
38. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Effects of HTS tape arrangements to increase critical current for the DC power cable", Applied superconductivity conference 2012, Portland, Oregon, (2012)
39. M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun, N. Yamamoto, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Status of a 200-meter DC Superconducting Power Transmission Cable after Cooling Cycles", Applied superconductivity conference 2012, Portland, Oregon, (2012)
40. N. Yamamoto, S. Yamaguchi, T. Kato, "Slicing of rotating SiC ingot by electric discharge machining", 9 European Conference on Silicon Carbide & Related Materials, Saint-Petersburg, Russia, (2012)
41. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, Y. Ivanov, J. Sun, and S. Yamaguchi, "Cooling experiments of 200 m-class superconducting direct current transmission system with high performance terminals", International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity (M2S 2012), Washington D.C., USA, (2012)
42. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, M. Minowa, "Developments of Peltier current lead for 200m-class superconducting direct current transmission and distribution system", 31th International Conference on Thermoelectrics, Aalborg, Denmark. (2012)
43. M. Hamabe, M. Kawashima, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Underground temperature measurement in the desert area for superconducting power cables", 2nd Asia-Arab Sustainable Energy Forum Jointly with 4th International SSB Workshop, Oran, Algeria, (2012)
44. S. Yamaguchi, M. Hamabe, T. Kawahara, H. Watanabe, J. Sun, J. Momoi, "Subjects and tasks to install the high power DC superconducting power transmission lines into Sahara desert", 2nd Asia-Arab Sustainable Energy Forum Jointly with 4th International SSB Workshop, Oran, Algeria, (2012)
45. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, Y. Ivanov, J. Sun, and S. Yamaguchi, "Time dependence of terminals temperature with current feeding in the superconducting direct current transmission test device of CASER-2", 24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference, Fukuoka, Japan, (2012)
46. Y. Toki, M. Hamabe, Y. Ivanov, H. Watanabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Calibration of Heat Leak Measurement of Cryogenic Pipe for DC Superconducting Power Transmission", 24th International Cryogenic Engineering

Conference-International Cryogenic Materials Conference, Fukuoka, Japan, (2012)

47. H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, M. Hamabe, T. Kawahara, and S. Yamaguchi, "Thermomechanical behavior of the superconducting cable of CASER2 at Chubu University", 24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference, Fukuoka, Japan, (2012)
48. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, J. Sun, S. Yamaguchi, "Direct experimental observation of strong thermo-siphon effect in the cryogenic pipe of the 200 m DC superconducting cable facility", 24th International Cryogenic Engineering Conference-International Cryogenic Materials Conference, Fukuoka, Japan, (2012)
49. T. Kawahara, H. Watanabe, M. Emoto, M. Hamabe, Y. Ivanov, J. Sun, S. Yamaguchi, "Interface strain analysis for Peltier current lead used in CASER-2", Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics 2011, New Delhi, India, (2011)
50. H. Watanabe, J. Sun, Y. Ivanov, M. Hamabe, T. Kawahara and S. Yamaguchi, "Recent activities for the development of superconducting DC power transmission systems at Chubu University", Tunisian Japanese Symposium on Science, Society and Technology, Hammamet, Tunisia, (2011)
51. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, J. Sun, S. Yamaguchi, "Observation Of The Thermal Siphon Effect In The Circulation Of Liquid Nitrogen In HTS Cable Cooling System", International Symposium on Superconductivity 2011, 東京・タワーホール船堀, (2011)
52. S. Yamaguchi, M. Emoto, T. Kawahara, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, A. Iiyoshi, "A Proposal of Multi-stage Current Lead for Reduction of Heat Leak", International Symposium on Superconductivity 2011, 東京・タワーホール船堀, (2011)
53. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, M. Minowa, "Possibility of a gas-cooled Peltier current lead in the 200 m-class superconducting direct current transmission and distribution system of CASER-2", International Symposium on Superconductivity 2011, 東京・タワーホール船堀, (2011)
54. H. Watanabe, J. Sun, Y. Ivanov, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Cooling Of The 200M Superconducting DC Power Transmission System At Chubu University", International Symposium on Superconductivity 2011, 東京・タワーホール船堀, (2011)
55. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, S. Yamaguchi, "A New Layout Of HTS Tapes And Its Critical Currents For DC Power Cables", International Symposium on Superconductivity 2011, 東京・タワーホール船堀, (2011)

56. Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, J. Sun, S. Yamaguchi, "Design study of LN₂ circulation in a long SC power transmission lines", European Conference on Applied Superconductivity, Den Haag, Netherland,(2011)
57. H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Cooling of the 200 m superconducting DC power transmission system at Chubu University", European Conference on Applied Superconductivity, Den Haag, Netherland,(2011)
58. M. Hamabe, T. Kawahara, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, M. Sugino, T. Fujii, S. Yamaguchi, "Magnetic energy storage of the 200-m superconducting DC transmission power cable test facility", European Conference on Applied Superconductivity, Den Haag, Netherland,(2011)
59. J. Sun, S. Yamauchi, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, "Critical current distributions of BSCCO tapes in the multi-layer HTS conductors", European Conference on Applied Superconductivity, Den Haag, Netherland,(2011)
60. S. Yamaguchi, Y. Ivanov, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, M. Sugino, H. Yamada, "Experiment of the 200-m superconducting DC transmission power cable in Chubu University", European Conference on Applied Superconductivity, Den Haag, Netherland,(2011)
61. H. Yamada, S. Yamaguchi, N. Yamamoto and T. Kato, "Cutting speed of electric discharge machining for SiC ingot", The 2011 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, Cleveland, Ohio, USA,(2011)
62. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, Y. Ivanov, and S. Yamaguchi, "High Performance Superconducting Transmission And Distribution For Short Length And Large Current Systems", 1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Nagoya (Winc Aichi), Japan, (2011)
63. S. Yamaguchi, T. Kawahara, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, Y. Ivanov and A. Iiyoshi, "Experimental Results Of The 200-Meter Cable Test Facility And Design Study Of The Longer And High Power DC Superconducting Power Transmisson For World Power Network", 1st Asia-Arab Sustainable Energy Forum, Nagoya (Winc Aichi), Japan, (2011)
64. J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, A. Iiyoshi, and S. Yamaguchi, "Critical Current Measurements of a Tape in the Hybrid Multi-Stacking High T_c Superconducting Tapes", 26th International conference on Low Temperature Physics, Beijing, China,(2011)
65. T. Kawahara, H. Watanabe, M. Emoto, M. Hamabe, S. Yamaguchi, Y. Hikichi, and M. Minowa, "Current dependence of heat leak on the terminals in the superconducting DC transmission and distribution system of CASER-2", 26th International conference on Low Temperature Physics, Beijing, China,(2011)
66. T. Kawahara, M. Emoto, M. Hamabe, H. Watanabe, Y. Ivanov, J. Sun, and S. Yamaguchi, "Thermoelectric properties dependence on the performance of Peltier current leads under over-current conditions", The 30th International Conference on Thermoelectrics, Traverse City, Michigan USA,(2011)

67. S. Yamaguchi, Y. Ivanov, S. Jian, M. Hamabe, H. Watanabe and T. Kawahara, “The experiments of 200-meter superconducting DC power cable in Chubu University and the estimation for longer cable cooling”, Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference, Spokane Convention Center Spokane WA, USA, (2011)
68. T. Kawahara, M. Emoto, H. Watanabe, M. Hamabe, J. Sun, Y. Ivanov and S. Yamaguchi, “Optimization of Peltier current lead for applied superconducting systems with the optimum combination of cryo-stages”, Cryogenic Engineering Conference & International Cryogenic Materials Conference, Spokane Convention Center Spokane WA, USA, (2011)
69. S. Yamaguchi, “Experiment of the 200-meter DC superconducting power cable and Perspectives of DC Superconducting power transmission and distribution”, International Academy of refrigeration, St. Petersburg, Russia, (2011)
70. S. Yamaguchi, Y. Ivanov, A. Sagara, M. Emoto, Y. Okamoto, H. Nakatsugawa, H. Kitagawa, M. Hamabe, H. Watanabe, J. Sun and T. Kawahara, “A proposal for electric power generation on diverter plate in nuclear fusion experiment”, XIV International Forum on Thermoelectricity, Moscow, Russia, (2011)

【国内学会発表】

71. 孫 建、宮田 成紀、山内 健吾、佐藤 裕貴、タロウリ・モハメド、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、築本 知子、井上 徳之、高野 廣久、イワノフ・ユーリ、山口 作太郎、「200m 高温超伝導直流送電ケーブル通電試験中臨界電流測定及び電流分布」2015 年度秋季低温工学・超電導学会、兵庫県姫路市、姫路商工会議所、(2016)
72. 孫 建、宮田 成紀、山内 健吾、佐藤 裕貴、タロウリ・モハメド、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、築本 知子、イワノフ・ユーリ、山口 作太郎、「200m 高温超伝導直流送電ケーブルの臨界電流測定と通電試験」、2015 年度春季低温工学・超電導学会、茨城県、産業技術総合研究所つくばセンター共用講堂、(2015)
73. M. Tallouli, J. Sun, Y. Ivanov, H. Watanabe, M. Hamabe, N. Chikumoto, S. Yamaguchi, O. Shyshkin, S. C-Kaddour, “Observation of inhomogeneous profiles of current density in BSCCO and YBCO tapes from residual magnetic field measurement”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学 湘南キャンパス、(2015)
74. S. Miyata, Y. Yoshiwara, H. Watanabe, K. Yamauchi, K. Makino, and S. Yamaguchi, 「テストベンチを用いた直流超伝導ケーブルシステム向けペルチェ電流リードの性能評価と過電流試験」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学 湘南キャンパス、(2015)
75. 山口 作太郎、築本 知子、「高温超伝導直流送電と北澤宏一先生」、第 62 回応用物理学会春季学術講演会、東海大学 湘南キャンパス、(2015)
76. イワノフ・ユーリ、渡邊 裕文、築本 知子、浜辺 誠、高野 廣久、孫 建、山口 作太郎、「200m DC HTS ケーブル装置の冷却試験中に熱サイホンの観測」、2014 年度秋季低温工学・超電導学会、コラッセふくしま、福島、(2014)

77. タロウリ・モハメド、孫 建、二宮 晃、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、筑本 知子、山口 作太郎、小田部 荘司、Shyshkin Oleg、C-Kaddour Samia, 「ホールプローブによる BSCCO 及び YBCO テープの残留磁場測定(Residual magnetic field measurement of BSCCO and YBCO tapes by a Hall probe)」, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, コラッセふくしま, 福島, (2014)
78. 小原 久人、山内 健吾、タロウリ・モハメド、孫 建、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、山口 作太郎, 「電磁銅版による高温超伝導テープ線材の積層導体の臨界電流向上」, 2014 年度秋季低温工学・超電導学会, コラッセふくしま, 福島, (2014)
79. 山口 作太郎, 「超伝導直流送電は世界をつなぐ —技術開発と課題—」, 中部大学開学 50 周年記念 研究夢構想シンポジウム, 中部大学, リサーチセンター, (2014)
80. 山口 作太郎, 「超伝導長距離送電は世界をつなぐ」, 中部大学開学 50 周年記念, 持続可能な地球と私のために(連続講演会), エネルギー問題を考える, ウィンクあいち, (2014)
81. 小原 久人、西村 亮太、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「高温超伝導テープ線材の積層導体における臨界電流測定」, 電気学会全国大会, 愛媛大学 城北キャンパス, (2013)
82. 浜辺 誠、渡邊 裕文、孫 建、河原 敏男、山口 作太郎, 「200m 級超伝導直流通電実証実験装置における連続通電試験」, 電気学会全国大会, 愛媛大学 城北キャンパス, (2013)
83. 河原 敏男、渡邊 裕文、浜辺 誠、山口 作太郎、江本 雅彦, 「200 m 級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)での冷却過程と長時間通電実験」, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学 相模原キャンパス, (2013)
84. 河原 敏男、渡邊 裕文、浜辺 誠、山口 作太郎、江本 雅彦, 「第 5 回冷却試験での冷却過程と長時間通電実験」, 第 12 回低温物質科学研究センター講演会, 京都大学, (2013)
85. タロウリ・モハメド、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、二ノ宮 晃、張 騰、シャルフィ・カドウル サミア, 「高温超伝導テープ線材の磁場測定(Magnetic field measurement of HTS conductors)」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 愛知県産業労働センター, (2013)
86. 小原 久人、孫 建、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、山口 作太郎, 「電磁鋼板を配置した高温超伝導テープ線材の積層導体における臨界電流測定」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 愛知県産業労働センター, (2013)
87. 孫 建、長野 圭輔、西村 亮太、タロウリ・モハメド、小原 久人、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「高温超伝導直流送電ケーブルに対する BSCCO テープ線材の臨界電流測定実験研究」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 愛知県産業労働センター, (2013)
88. 浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「アルジェリアにおけるサハラ・ソーラー・ブリーダー計画」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 愛知県産業労働センター, (2013)

89. 渡邊 裕文、イワノフ・ユーリ、浜辺 誠、筑本 知子、河原 敏夫、山口 作太郎, 「200m 級超伝導直流送電実験装置における冷媒循環試験」, 2013 年度秋季低温工学・超電導学会, 愛知県産業労働センター, (2013)
90. 西村 亮太、小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「BSCCO テープ線材の積層構造における臨界電流測定」, 電気関係学会東海支部連合大会, 静岡大学 浜松キャンパス, (2013)
91. 長野 圭輔、小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「BSCCO テープ線材のひねりに対する臨界電流の変化」, 電気関係学会東海支部連合大会, 静岡大学 浜松キャンパス, (2013)
92. 渡邊 裕文、孫 建、山本 則正、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「200 m 級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)の冷却試験」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学 京田辺キャンパス, (2013)
93. 河原 敏男、渡邊 裕文、浜辺 誠、山口 作太郎、江本 雅彦, 「200 m 級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)での端末の熱侵入の時間相関」, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学 京田辺キャンパス, (2013)
94. 浜辺 誠、渡邊 裕文、孫 建、河原 敏男、山口 作太郎, 「200m 級超伝導直流送電実証実験装置における第 5 期冷却試験」, 2013 年度春季低温工学・超電導学会, タワーホール船堀、東京, (2013)
95. 吉富 邦和、小田部 荘司、ビャトキン・ウラジミール、木内 勝、松下 照男、浜辺 誠、山口 作太郎、稲田 亮史, 「超電導直流送電ケーブルにおけるリップル電流による交流損失」, 2013 年度春季低温工学・超電導学会, タワーホール船堀、東京, (2013)
96. 孫 建、小原 久人、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「超伝導直流ケーブルの構造に対するテープ線材の臨界電流特性」, 2013 年度春季低温工学・超電導学会, タワーホール船堀、東京, (2013)
97. M. Tallouli, Y. Toki, H. Ohara, J. Sun, H. Watanabe, M. Hamabe, T. Kawahara, S. Yamaguchi, “Magnetic field measurement of HTS tapes”, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, (2012)
98. 河原 敏男、浜辺 誠、渡邊 裕文、山口 作太郎、岡本 庸一、緒方 雄大、真下 茂, 「重力場プロセスによる傾斜機能材料の超伝導直流送配電システムへの応用の検討」, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川工科大学, 29p-B6-7, (2012)
99. 土岐 由信、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、山口 作太郎, 「直流超伝導送電のための断熱二重管の熱侵入量測定とその真空度依存性」, 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス, (2012)
100. 小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「電磁鋼板による高温超伝導テープ線材の臨界電流測定」, 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス, (2012)

101. 浜辺 誠、渡邊 裕文、孫 建、山本 則正、イワノフ・ユージ、河原 敏男、山口 作太郎、「200 m 超伝導直流送電ケーブル実験装置における冷却・昇温過程」, 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス, (2012)
102. 山本 則正、加藤 智久、山口 作太郎、「被加工物回転機を用いた SiC インゴットの放電加工」, 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス, (2012)
103. 孫 建、水野 博貴、安倍 宏典、小原 久人、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、「直流超伝導ケーブルのための配置による臨界電流の測定」, 電気学会全国大会, 名古屋大学 東山キャンパス, (2012)
104. 孫 建、水野 博貴、安部 宏典、小原 久人、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、「超伝導直流送電ケーブルのための配置による臨界電流の測定」, 第 86 回低温工学・超伝導学会, いわて県民情報交流センター(アイーナ), (2012)
105. 小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、「電磁鋼板を配置した高温超伝導テープ線材の臨界電流測定」, 第 86 回低温工学・超伝導学会, いわて県民情報交流センター(アイーナ), (2012)
106. 土岐 由信、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、山口 作太郎、「直流超伝導送電用断熱二重管における熱侵入量の真空度依存性」, 第 86 回低温工学・超伝導学会, いわて県民情報交流センター(アイーナ), (2012)
107. 内村 晃治、山本 則正、山口 作太郎、加藤 智久、「回転台を用いた SiC インゴットの放電加工」, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, 豊橋技術科学大学, (2012)
108. 佐久間 貴之、芳村 幸治、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、「太陽光発電と蓄電池による直流給配電システム」, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, 豊橋技術科学大学, (2012)
109. 安倍 宏典、水野 博貴、小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎、「直流超伝導送電用ケーブル設計のための超伝導テープ線材の臨界電流測定」, 平成 24 年度電気関係学会東海支部連合大会, 豊橋技術科学大学, (2012)
110. 河原 敏男、渡邊 裕文、浜辺 誠、山口 作太郎、江本 雅彦、引地 康雄、箕輪昌啓、「200m級超伝導直流送電実証実験装置(CASER-2)での通電中の端末の温度変化と熱侵入評価」, 第 73 回応用物理学会, 愛媛県愛媛大学城北地区、松山大学文京キャンパス, (2012)
111. 河原 敏男、江本 雅彦、浜辺 誠、渡邊 裕文、山口 作太郎、引地 康雄、箕輪昌啓、菅根 秀夫、「200 m 級超伝導直流送電実証実験装置における ペルチェ電流リードの開発」, 第 9 回日本熱電学会学術講演会, 東京工業大学 東工大蔵前会館, (2012)
112. 土岐 由信、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、山口 作太郎、「直流超伝導送電ケーブル用断熱配管の熱侵入量の精密測定」, 電気学会全国大会, 広島工業大学 五日市キャンパス, (2012)
113. 浜辺 誠、渡邊 裕文、孫 建、山本 則正、ユージ・イワノフ、河原 敏男、山口 作太郎、「200m 超伝導直流送電ケーブル実験装置における性能試験の現状」, 電気学会全国大会,

広島工業大学 五日市キャンパス, (2012)

114. 小原 久人、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「高温超伝導テープ線材の積層構造における臨界電流測定」, 電気学会全国大会, 広島工業大学 五日市キャンパス, (2012)
115. 河原 敏男、山口 作太郎, 「超伝導直流送配電システムの熱侵入低減のためのペルチェ電流リードの開発」, 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, (2012)
116. 河原 敏男、渡邊 裕文、浜辺 誠、孫 建、イワノフ・ユージ、山口 作太郎, 「超伝導送配電システムの熱侵入低減とペルチェ電流リード」, 第 10 回低温物質科学研究センター講演会・研究交流会, 京都大学, (2012)
117. 山田 秀貴、山本 則正、山口 作太郎、加藤 智久, 「SiC 放電加工の放電確率と加工速度との関係」, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会, 愛知県産業労働センター(ウインクあいち), (2011)
118. 山本 則正、赤星 勇利、山田 秀貴、加藤 智久、山口 作太郎, 「インゴット回転台を用いた炭化ケイ素のワイヤー放電加工」, SiC 及び関連ワイドギャップ半導体研究会 第 20 回講演会, 愛知県産業労働センター(ウインクあいち), (2011)
119. 小原 久人、山内 駿、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「大電流直流超伝導ケーブル向け積層構造高温超伝導テープ線材の臨界電流測定」, 第 85 回低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座, (2011)
120. 山口 作太郎、浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、江本 雅彦, 「低熱侵入多段ガス冷却電流リードの提案」, 第 85 回低温工学・超電導学会, 金沢歌劇座, (2011)
121. 清水 亮祐、山内 駿、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「大電流高電圧直流超伝導ケーブルのためのテープ線材の臨界電流測定」, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, (2011)
122. 小原 久人、山内 駿、孫 建、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「低電圧大電流直流高温超伝導ケーブルのための超伝導テープ線材の臨界電流測定」, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, (2011)
123. 山田 秀貴、赤星 勇利、半月 寛之、山本 則正、山口 作太郎、加藤 智久, 「加工速度による SiC 放電加工への影響」, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, (2011)
124. 赤星 勇利、半月 寛之、山田 秀貴、山本 則正、渡邊 裕文、浜辺 誠、河原 敏男、山口 作太郎, 「被加工物回転台を用いたワイヤ放電加工」, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, (2011)
125. 半月 寛之、赤星 勇利、山田 秀貴、山本 則正、山口 作太郎、加藤 智久、村上 雅人、関宏範、丸山 忠克, 「YBCO のワイヤ放電加工での酸素ガス濃度影響」, 平成 23 年度電気関係学会東海支部連合大会, 三重大学, (2011)

126. 河原 敏男、江本 雅彦、渡邊 裕文、浜辺 誠、孫 建、ユーリ・イワノフ、山口作太郎、「ペルチェ電流リードの断熱性能への中間ステージの影響の検討」, 第 72 回応用物理学会, 山形県小白川キャンパス, (2011)
127. 石原 範之、山口 作太郎、杉山 佐保、河原 敏男、福田 真治、「熱電効果を考慮したデバイスシミュレーション」, 第 8 回日本熱電学会学術講演会, 北海道大学, (2011)
128. 中津川 博、佐藤 哲朗、岡本 庸一、河原 敏男、山口 作太郎、「n 型 Si 基板を用いた MOSFET の自己冷却効果」, 第 8 回日本熱電学会学術講演会, 北海道大学, (2011)
129. 河原 敏男、江本 雅彦、浜辺 誠、渡邊 裕文、イワノフ・ユーリ、孫 建、山口作太郎、「ペルチェ電流リードの電流依存性と形状因子最適化」, 第 8 回日本熱電学会学術講演会, 北海道大学, (2011)
130. 浜辺 誠、渡邊 裕文、河原 敏男、孫 建、イワノフ・ユーリ、芳村 幸治、山口作太郎、「200m 超伝導直流送電ケーブル実験装置の通電試験- 2」, 2011 年度春季低温工学・超電導学会, 物質・材料研究機構(千現地区) 研究交流センター、茨城県つくば市, (2011)