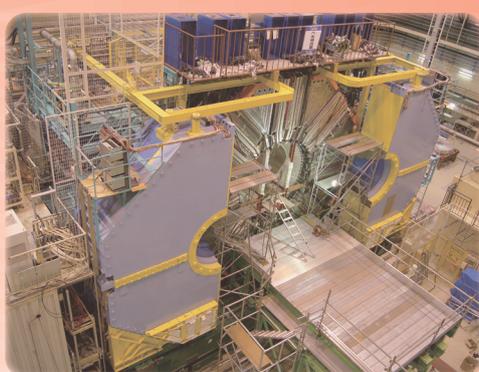




FOUNDATION FOR HIGH ENERGY  
ACCELERATOR  
SCIENCE

# FAS だより

2018.11 第17号



公益財団法人  
高エネルギー加速器科学研究奨励会

## ■ 広報誌「FAS だより」第17号の発行に当って ■

- 賛助会員の皆様には益々ご清栄のこととお慶び申し上げます。  
日頃より、当公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会に対する格別のご協力を頂き、心から厚くお礼申し上げます。
- 広報誌「FAS だより」も公益財団法人に移行してから第17号を発行することになりました。
- 加速器セミナーおよび特別講演会のテーマ等でご希望・ご要望等がありましたら奨励会事務局までお寄せください。
- 賛助会員の皆様で、広報誌「FAS だより」に投稿したい高エネルギー加速器に関する記事等がございましたら是非お知らせ下さい。投稿をお待ちしております。
- 当公益財団法人の「ホームページ」・広報誌「FAS だより」等をご覧いただき、より良いものにするために皆様のご意見をお寄せください。お待ちしております。
- 賛助会員のバナー広告掲載について  
当公益財団法人のホームページ上に賛助会員様のバナー広告を掲載しております。  
バナー広告掲載を希望される賛助会員様は、ぜひご利用ください。(無料)

< 連絡先 :info@heas.jp 又は TEL/FAX029-879-0471 >

公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 事務局

# FASだより 第17号 目次

平成30年11月

## 1. 研究助成報告

- 1) 高校生サイエンスキャンプ「Belle Plus」における加速器科学アウトリーチ手法の研究  
(高エネルギー加速器研究機構) 自 30.08.06 至 30.08.09..... 1  
高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 助教 中山 浩幸 氏
- 2) 「ILC夏の合宿2018」  
(山口県下松市笠戸島 国民宿舎 大城) 自 30.09.09 至 30.09.12..... 4  
広島大学大学院先端物質科学研究科 教授 栗木 雅夫 氏

## 2. 国際交流助成報告

- 1) 「29th Linear Accelerator Conference-LINAC18 (16-September 21, 2018)」  
(中国・北京 IHEP) 自 30.09.16 至 30.09.21..... 9  
東京大学博士課程 学生 北村 遼 氏
- 2) 「環境によって異なるミュオニウムラジカルを与える有機分子の精密 $\mu$ SR解析」  
(カナダ・バンクーバー (TRIUMF)) 自 30.09.17 至 30.09.23 ..... 12  
東京工業大学 物質理工学院応用化学系 准教授 伊藤 繁和 氏
- 3) 「高温超伝導線材の電気的接合抵抗における層間抵抗の測定手法開発」  
(アメリカ・シアトル) 自 30.10.28 至 30.11.02..... 16  
東北大学 大学院工学研究科 量子エネルギー工学専攻エネルギー物理工学講座  
核融合炉電磁流体工学分野 博士前期課程1年 早坂 遼一路 氏

## 3. その他の報告

- 1) 「第35回 高エネルギー加速器セミナー OHO'18」報告  
(高エネルギー加速器研究機構) 自 30.09.04 至 30.09.07..... 20  
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授 小林 幸則 氏

2) 「第8回 特別講演会」報告 (アルカディア市ヶ谷) 30.10.10.....	22
講演. 1 「世界で幅広く展開する超伝導加速器の現状と将来」 講演者 加古 永治 氏 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授	
講演. 2 「いよいよ始まった宇宙の起源を探る SuperKEKB/Belle II 実験」 講演者 宇野 彰二 氏 大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 副所長・教授	
4. その他	
1) 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 賛助会員一覧 (平成30年11月1日現在).....	25
2) 公益財団法人 高エネルギー加速器科学研究奨励会 評議員・役員・ 選考委員会委員一覧 (平成30年11月1日現在).....	26

## 高校生サイエンスキャンプ「Belle Plus」 における加速器科学アウトリーチ手法の 研究

高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所  
Belle グループ 助教  
中山 浩幸

宇宙の成り立ちの謎に迫る国際共同プロジェクト「Belle II (ベル・ツー)」は、次世代への科学普及にも長年力を入れてきました。その取り組みの一つが、約 20 名の高校生を 4 日間 KEK に招待する研究体験型サイエンスキャンプ「Belle Plus (ベル・プリュス)」です。このプログラムで TA として重要な役割を担う大学院生の旅費に対し、今回、加速器奨励会より助成を受けました。

Belle Plus では、「実験から結論までの科学的な考察技法」を体得してもらうことを目的に「研究者と同一の研究環境における研究体験」を基軸としたプログラムを 2006 年からほぼ毎年開催してきました。高校生の旅費を全額サポート・大学院レベルの内容を高校生向けにわかりやすく再構成した実験内容・最終日の高校生自身による研究発表・研究者と大学院生が多数参加する手厚い

サポート体制など、過去 11 回の開催のたびに改良を重ね、他に類を見ない良プログラムに成長してきました。

本プログラムは、高校生が最先端科学を学ぶだけでなく、ティーチングアシスタントとして参加する大学院生が、最先端科学をわかりやすく伝える教育手法を模索する場という面があり、従来から奈良教育大と連携して運営しています。高校生の旅費を全額サポートすることで、関東圏に限らない多様な地域の高校生が参加し、科学教育手法に関するより一般的で深い知見が得られると期待されます。

今年度の Belle Plus (ベル・プリュス) は、8 月 6 日から 4 日間、つくば市大穂の KEK つくばキャンパスで開かれ、全国から集まった高校生 23 人が、素粒子研究の現場で課題研究に取り組みました。このキャンプは、素粒子実験の研究現場を実際に体験することで、KEK のスーパー B ファクトリー加速器と Belle II 測定器を使った研究の意義を理解してもらうとともに、研究の奥深さや広がりや、一つの結論に到達するまでの難しさを体得してもらうことを目的としています。次世代を担う研究者の育成につながることを願い、2006 年から行われています。12 回目の今回も、KEK と奈良教育大の共催で開かれました。



今回は KEK による助成に、加速器科学奨励会からの助成・前年度に行ったクラウドファンディングによる一般の方からの支援を合わせることで、北海道から沖縄県まで全国から幅広く、男女合わせて 23 人の生徒を招待することができました。



集まった 23 人の高校生たちは、宇野彰二・KEK 素粒子原子核研究所副所長による「積極性を大切にして四日間を過ごしてください」という開会のあいさつに呼応するようにキャンプをスタート。「B-Lab 班」、「宇宙線速度測定班」、「ワイヤーチェンバー班」、「理論班」の計 4 班に分かれ、講師役の研究者と大学院生の TA の指導の下、それぞれ与えられた課題に挑戦しました。



「B-Lab 班」は、1999 年から 2010 年まで稼働した Belle 測定器を使った実験で実際に収集されたデータの一部を、自作の解析プログラムにかけ、新粒子を探すというデータ解析プロセスを体験しました。



「宇宙線速度測定班」は、机の上下に設置した二本の測定装置「シンチレータ」で、宇宙から降ってくる宇宙線を捉え、測定データから速度を計算する取り組みに挑戦。予想外の結果をどう解釈すべきか考察を深めるといふ研究の醍醐味を体験しました。



「ワイヤーチェンバー班」は、ガスを満たした容器内にさまざまな太さのワイヤーを張り、荷電粒子の飛跡を捉えるワイヤーチェンバーを自作し、X 線源やベータ線源などを使ってその性質を調べる試みに挑戦しました。



「理論班」は、標準模型によって記述される素粒子の振る舞いを、ファインマン図に書き起こす演習をこなし、「B-Lab 班」の解析データからどんな粒子が誕生したのかを推測する課題に挑戦しました。

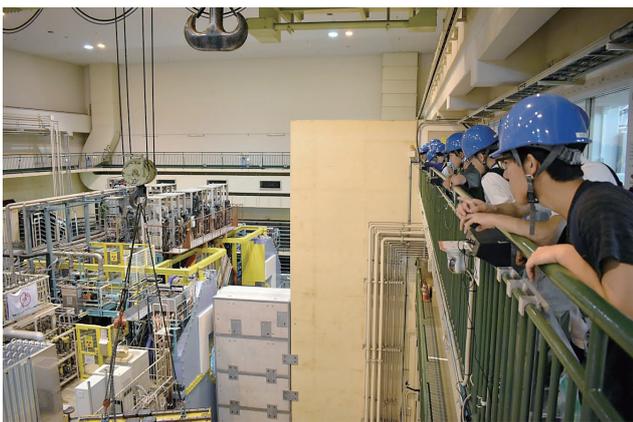


「研究を成功させるにはコミュニケーション能力も大事だとわかった」などの声が聞かれました。TAとしてこのキャンプに参加した大学院生たちからは、「素粒子や加速器という新しい概念を高校生に説明できるか不安だったが、高校生たちの熱意に驚かされた」といった声が聞かれました。

本プログラムの様子は、東京新聞（8/10）、読売新聞（8/14）で報道されました。

（了）

最終日には、自分たちの結果を自分たちでスライドにまとめ、班ごとに研究発表会を行いました。他班の発表内容に対しても積極的に質問する生徒たちの姿が見られました。壇上の高校生は、研究者からの突っ込んだ質問にも精一杯答えていました。サプライズで登場した小林誠・KEK 特別栄誉教授からキャンプ修了証を手渡され、高校生たちは大喜びでした。



班ごとの課題実習に加え、KEK 内の施設見学やサイエンスカフェなど盛りだくさんの3泊4日。高校生たちからは「毎日が新鮮でした」「研究者になるのが夢で、ますます思いが強くなった」

## ILC 夏の合宿 2018 の開催補助

広島大学  
先端物質科学研究科  
栗木 雅夫

### はじめに

ILC 夏の合宿は、ILC (International Linear Collider) の実現のために、実験物理学者 (高エネルギー物理学等)、理論物理学者 (素粒子理論等)、加速器研究者 (加速器理論、加速器開発等) の三者が集い、ILC の加速器、物理、理論について寝食をともにしながら議論することを通じて ILC の実現を目的として 2010 年から開始されています。また、ILC とは直接関係はしない研究者を講師として招くことで、物理の幅と人的なネットワークの拡大により、素粒子物理学全体の発展をも意図しています。

### 1. 高エネルギー物理学の現状と ILC

2018 年の現在まで、LHC では Higgs 粒子を除く、超対称性粒子などの新しい粒子の発見は報告されていません。このことは何を意味するのでしょうか？ 標準理論は質量の無い粒子のゲージ不変な理

論として出発しましたが、質量を手で入れこむ人為的な操作など物理の基本理論としてはあまりにも不自然なものです。ヒッグス粒子はその質量生成機構を説明するために導入され、実験的にも発見されましたが、とても奇妙な存在であり、その背後により基本的な構造が隠されていると考えるのが自然です。Higgs は唯一のスピンゼロの粒子であり、真空の自発的対称性の破れを引き起こし、ボゾンに質量を与え、真空に凝縮し、湯川結合によりフェルミオン (クォーク、レプトン) に質量を与え、と標準理論の矛盾をすべて解決して現在の宇宙を支えている存在です。

幸いなことに、標準理論で仮定された粒子のすべては、我々の手の内にあります。すなわち、標準理論のすべての粒子のパラメーターを詳細に決定できれば、標準理論の自己整合性の検証が行えるという、Higgs 粒子発見以前とは異なる時代に我々は突入しているのです。標準理論が完結した無矛盾の整合した体系ならば、パズルの如く、各粒子のピースはピタリとはまり合い、最後には綺麗な絵が完成するはずですが、標準理論に矛盾が含まれれば、どこかのピースはうまくはまらず絵は完成しません。



写真1：会場となった国民宿舎大城（山口県下松市）の玄関前での集合写真。参加者で隠れているが、背後には笠戸湾の雄大な眺めが広がっている。看板の絵は下松市が誇る日立製作所笠戸工場で製作されている新幹線 N700 系と、名物のヒラメのイラスト。



写真 2：講演者の発表に聞き入る合宿参加者。

ピースの中でもっとも測定精度の乏しいものは、発見間もない Higgs 粒子です。そして、すでに述べたように、Higgs 粒子は大変奇妙で、多くの役割を押し付けられ、それをいとも簡単にこなしているように見えます。すなわち、Higgs 粒子を集中的に調べることで、標準理論のほころびが発見される確率は、極めて高いのです。

## 2. ILC 夏の合宿 2018

本年は、素粒子物理学の歴史的瞬間という時代背景に加えて、ILC においても極めて重要な年です。現在、学術会議において ILC についての特別委員会が開催され、結論が近々出されるはずですが、来年から開催される欧州の素粒子物理学の大方針を決める European Strategy では、今年の 11 月あたりまでに日本が ILC をホストすることに向けた国際交渉に乗り出すことを条件に、欧州が ILC に財政的な負担を伴った参加という方針を議論されることになっています。米国は閣僚レベルの発言として、ILC への財政的負担をとまなう参加を表明しておりますので、日本が今年中に国際交渉の開始を表明すれば、アジア、欧州、そして米国の三極による ILC 計画が実質的に開始される状況にあります。

そのような重要な曲面の中で、本合宿は開催されました。会場は山口県下松市笠戸島にある国民宿舎大城。9 月 4 日には台風 21 号が上陸し、関西地方を中心に大きな被害がありました。合宿期間中はまだ関西空港は運行再開されておらず、海外の会合から関西空港に降り立ち合宿に参加する予定であった数名は参加ができませんでした。また、直前の 9 月 6 日には北海道胆振東部地震が発生し、やはり参加者一名が参加を断念せざるを得ませんでした。それでも 70 名を超える参加者を得て、ILC 夏の合宿は盛大に開催されました。会場となった国民宿舎大城の全面的な協力のもと、期間内は ILC 合宿の貸し切りとしていただき、本来は必要である会議場の使用料などを払わずに朝から晩、というよりは 24 時間体制で使用させていただき、参加者は合宿を満喫できたことでしょう。国民宿舎大城は、全国にある国民宿舎の中でもっとも新しく、部屋も広く快適、窓からは笠戸湾のオーシャンビュー、天然温泉と瀬戸内の海の幸を堪能させていただきました。

合宿初日の 9 日は 13 時 30 分より開始され、ILC 加速器の概要、ILC 測定器 Overview, ILC 物理 Overview などに加え、招待講師として広島大学宇宙物理センターの植村誠氏から重力波観測と宇宙論と題した講演がありました。重力波観測は

技術的な面や、一般相対論の実験的検証という意味で語られがちですが、通常は得られない遠い宇宙空間の情報を得るという意味で、宇宙論的な側面からも、予想外にかなり重要で有用であるとの話は興味深く拝聴しました。もう一人の招待講師である量研機構の早川岳人氏からは、角運動量をもった光子というタイトルで、最近話題のボージェツクス光について講演がありました。レーザー、放射光などで、相次いでボージェツクス光が発見され、その物理、応用などが活発に議論しています。早川氏によると、このような光はヘルムホルツ方程式の解であるラゲールガウシアンモードあるいはエルミーとガウシアンモードと呼ばれるもので、従来の電磁気理論から導かれるものですが、観測されてこなかったため新奇な光としてとらえられているとのことでした。

その他にも講演はすべて興味深いものばかりでした。詳細は下記 WEB ページからご覧いただければと思います。過去の合宿もここから閲覧することができます。

ILC 夏の合宿 2018 WEB page

<https://agenda.linearcollider.org/event/7980/overview>

### 3. ナイトセッションとヤングセッション

ILC 夏の合宿ではユニークな取り組みとして、ナイトセッションとヤングセッションが行われています。

今回もナイトセッションがプログラムとして組み込まれ、座長の乾杯の掛け声とともに講演がスタートしました。セッションのプログラムが終わっても、非公式なセッション（いわゆる飲み会）は終わるはずもなく、鍵を管理していた主催者である著者は最後まで付き合う羽目となり、昼間のセッションでは若干ながら居眠りをする羽目となりました。講演者の方にはお詫び申し上げます。

もう一つのヤングセッションは、主に大学院

生向けに短時間の発表をしてもらおうと、主に現在の研究テーマについて、5分程度で講演をしてもらいます。これも毎年多くの参加者があり、時間があまりとれないのが悩みです。今回はヤングセッションに申し込んだもののうち、内容的にしっかりしていそうな学生を選び出し、ナイトセッションで思う存分話してもらおうという試みをしました。おかげで今回は講演時間として一人当たり 10 分を確保でき、学生の皆さんもある程度は落ち着いて発表できたのではないかと思います。

### 4. 日立製作所笠戸事業所への遠足

今回の笠戸島周辺で注目すべきスポットとしては、今治造船の新笠戸ドック、そして日立製作所の笠戸事業所があります。特に日立製作所笠戸事業所は、鉄道車両の製造工場としては国内有数の規模をほこる、その業界ではかなり有名な存在です。日立製作所は ILC のクライオモジュール製作にも取り組んでいる企業であり、おなじ大型鉄鋼製品として鉄道車両製作現場を体感することは加速器設計、建設において非常に有用である、という主催者の強い意向もあり、本事業所の見学を合宿遠足とすることとしました。

笠戸事業所では、初代 0 系を含むほぼすべての新幹線車両が製作されており、現在でも JR 東海 N700 系や、JR 東日本 E5, E6, E7 系などが製造されています。それぞれ、東海道、山陽、九州新幹線、東北・秋田新幹線、北陸新幹線などで現在でも運用されています。それに加え、加速器・高エネルギー業界の人になじみあるものとして、つくばエクスプレスの TX2000 系がこの笠戸事業所で製作されています。TX2000 系は交直両用型車両として、秋葉原からつくばまで運行されており、つくばに電車で行く人はかならず利用している車両です。ちなみに、直流型車両 TX1000 は川崎重工兵庫工場で作られています。TX1000 は直流専用車なので、直流電化区間である秋葉原から守屋まで運行されています。守屋からつくばは交流電化区間です。



写真3：遠足として見学に訪れた日立製作所笠戸事業所。所内全般は撮影禁止であるが、ここだけは記念撮影スポットとして、撮影が許可されている。背後にあるのは日立製作所が製作したモノレールの車両。

バスで大城を出発した我々は、20分ほどで笠戸事業所に到着しました。最初に10分程度笠戸事業の概要を紹介したビデオを見てから、ヘルメット、防護眼鏡などの装備を整え、2班に分かれて見学の開始です。バスで工場中央通りをゆっくりと進むと、左右に次々と車両工場が現れ、なじみのある車両が多くみられました。

日立の笠戸事業所ではプラント向け製品も製造していますが、トリスタンの超伝導空洞用の冷凍機はここで製作されたことを今回の訪問で初めて知りました。トリスタンは超伝導空洞を始めて加速器に取り入れましたが、その稼働から30年以上を経て、超伝導加速器 ILC の合宿で訪れる因縁を感じました。

日立の笠戸事業所は地域社会においても自慢の存在らしく、国民宿舎大城のロビーには新幹線700系のグリーン車仕様の座席がソファの代りに並べられておりました。イギリス向け800系の出荷は大型船が接岸できる下松市の公共ふ頭から行われるため、夜間に数キロの区間、公共道路を

利用しての陸送がしばしば行われています。この陸送を下松市のPRに利用しようと、わざわざ昼間にイベントとして行ったらしく、宿舎のロビーにあるモニターにはその風景がエンドレスで流されておりました。当日は3万もの見物客が押し寄せたようです。

## 5. ILC 夏の合宿のこれから

来年以降の ILC 夏の合宿について考えたいと思います。来年以降の ILC の夏の合宿については、今後の ILC の状況に大きく依存することになるのは疑いようがありません。理想的な場合は、学術会議が、ILC の学術的な意義を認め（これは前回の学術会議答申ですすでに認められています）、さらに実施する条件が十分に整っており、ILC の推進を政府に勧告する、という答申を出すことです。

中立的な答申がでて、政府や省庁は実施の可能性の向けた検討にはいるので、実質的には同じことでしょう。学術会議が、ILC の学術的意義は認めるが、技術的に未成熟で実施可能性が極めて低いと判断されると（我々は非常に心外ですが）、

おそらく ILC 計画は中止となるでしょう。技術的内容に我々は自信っていますので、このような答申ができることは考えにくいのですが。

懇親会の席上、リニアコライダーの検討当初から主導的な役割を担ってきた KEK の横谷氏は「いずれにしろ、ILC 夏の合宿は今年で終わりかと思っています。ILC が走った場合、合宿をやるどころではない、という可能性があります。また、合宿をやるにしても、このような家庭的な雰囲気合宿ではなく、位置づけや性格が変わる可能性が高いと思われます。そして、これが一番残念な場合ですが、ILC 計画そのものが終わるという可能性もあります。今回の宿舎は非常にきれいで立地も素晴らしい。ILC 夏の合宿の最後を飾るに相応しいものです。ILC 夏の合宿が発展的に解消され、来年からは新たな形の合宿として再開したいですね。」という趣旨の発言をしていました。

## 6. 最後に

他人との議論は人間の進歩に重要な要素です。本合宿のような機会は、ILC という特定のプロジェクトにとってだけでなく、物理、そして科学研究にとって大きな意味があったといえるでしょう。ILC 夏の合宿は今回で最後かもしれませんが、新たな形で来年も「ネオ ILC 夏の合宿」を行いたいと思っています。

今回、加速器奨励会から補助という形で予算的な支援をいただくことができました。このような催しの主役は大学院生ですが、常に大学院生の旅費の確保が大きな課題となっています。過去には大学院生の旅費が確保できないという理由で、大幅に参加者が減少した年もありました。今回の支援のすべては、旅費確保が困難な大学院生の交通費として支給いたしました。ここで改めて支援に対してお礼を述べるとともに、本合宿の理念を理解してくださったことに敬意を表したいと思います。

## 29th Linear Accelerator Conference (LINAC 18)

東京大学大学院  
理学系研究科物理学専攻  
北村 遼

### 1. はじめに

本報告は高エネルギー加速器科学研究奨励会研究助成・国際交流助成による、国際会議 29th Linear Accelerator Conference (LINAC 18) での研究成果発表に関するものである。LINAC は線形加速器について隔年で開かれる国際会議であり、伝統ある会議として認知されている。本会議では世界初となるミュオン RF 加速実証実験の結果について成果発表を行った。

### 2. 研究概要

#### 2.1. 低エミッタンスミュオンビーム

第二世代の荷電レプトンであるミュオンは陽子ビームからパイオン崩壊を経て生成され、素粒子実験から物性研究まで幅広い学術領域に利用されている。だが、この陽子ビーム由来のミュオンは三次ビームであるがゆえに本質的に大きなビーム広がりを持っている。陽子ビーム由来ミュオンビームの規格化横エミッタンスは約  $1000 \pi \text{ mm mrad}$  で、陽子ビームの典型的な規格化横エミッタンスが約  $1 \text{ mm mrad}$  であるのに比べて約 3 桁大きい。このエミッタンスの大きなミュオンビームは、ビーム冷却と高周波 (RF) 加速器による再加速を経て、陽子ビームと同程度のエミッタンスを持つ低エミッタンスミュオンビームにすることができる。茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) では、低エミッタンスミュオンビームを用いることで素粒子標準模型を超えた新物理探索を目指し、ミュオン双極子能率の精密測定実験が計画されている [1]。また、低エミッタンスミュオンビームはミュオンスピン回

転・緩和・共鳴法 ( $\mu\text{SR}$  法) を通じてより詳細な物性研究などへも応用が期待されており、新たな研究領域開拓を実現にする技術として注目を集めている。

#### 2.2. ミュオン RF 加速

ミュオンは寿命約  $2.2 \mu\text{s}$  で崩壊するため、ミュオン加速には短時間で加速可能な線形加速器を用いる。J-PARC 内の物質・生命科学実験施設 (Materials and Life science experimental Facility, MLF) では、ミュオン専用線形加速器を建設すべく計画が進められている [2]。一方でミュオンの RF 加速は未だ実証されておらず、ミュオン線形加速器実現にはミュオン RF 加速実証実験 (以下加速実験) の達成が急務であった。そこで我々の研究グループでは高周波四重極線形加速器 (Radio-Frequency Quadrupole linac, RFQ) を用いて、世界初となるミュオン RF 加速実証実験を行った。

#### 2.3. 負ミュオニウムイオン生成

加速実験でのミュオン冷却には負ミュオニウムイオン ( $\text{Mu}^-, \mu^+$  と電子 2 個の束縛状態) 生成過程を用いる。MLF から供給される正ミュオン ( $\mu^+$ ) ビームをアルミニウム製薄膜標的に照射することで、平均運動エネルギー  $0.2 \text{ keV}$  に冷却された  $\text{Mu}^-$  が生成される。加速実験に向けた予備実験として、MLF のミュオンビームを使って  $\text{Mu}^-$  生成実験を行った。Fig. 1 に  $\text{Mu}^-$  生成実験のセットアップを示す。 $\text{Mu}^-$  ビームは標的部分に設置された静電加速器により引き出された後、診断ビームラインを経て検出器まで輸送される。 $\text{Mu}^-$  ビームには標的を通過した  $\mu^+$  や、ミュオンからの崩壊陽電子、静電加速器の電極部分で生じた低エネルギー電子といった多量のバックグラウンドが含まれる。そのため診断ビームラインには静電偏向器と偏向電磁石を設置して、運動エネルギーと運動量の両方を選別することによりバックグラウンドを抑制している。さらに J-PARC のパルスミュオンビームの特性を生かして、Time-

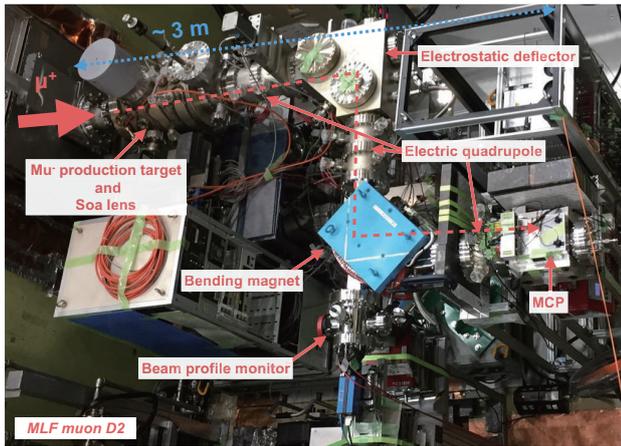


Fig. 1 Mu<sup>-</sup> 生成実験のセットアップ。

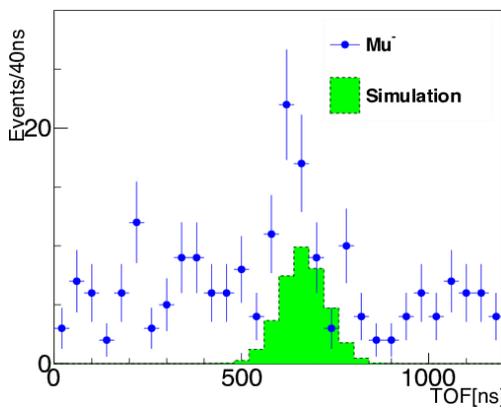


Fig. 2 Mu<sup>-</sup> 生成実験で測定された TOF 分布。

Of-Flight (TOF) 測定の情報も用いることにより、明確な信号の同定が可能となった。Fig. 2 に TOF の測定結果を示す。シミュレーションによる予想と合致する時間領域に Mu<sup>-</sup> の信号が確認できる。この実験結果により、Mu<sup>-</sup> 源の開発及び Mu<sup>-</sup> ビームの同定手法を確立することができ、加速実験に必要な準備が整った。

#### 2.4. ミューオン RF 加速実証実験

予備実験で開発した Mu<sup>-</sup> 源を用いて、加速実験に臨んだ。Fig. 3 に加速実験のセットアップを示す。Mu<sup>-</sup> ビームは静電加速器によって 5.6 keV に静電加速された後 RFQ へと入射され、さらに 89 keV まで RF 加速される。この加速 Mu<sup>-</sup> ビームには RFQ で加速されなかった  $\mu^+$  や崩壊陽電子といったバックグラウンドが含まれる。特に Mu<sup>-</sup>

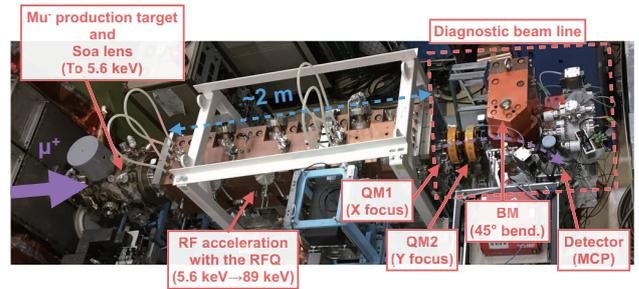


Fig.3 加速実験のセットアップ。

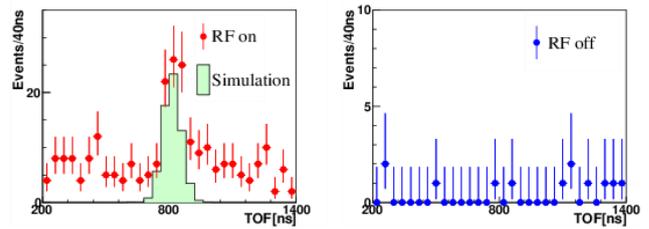


Fig. 4 加速実験における RF パワー on/off での TOF 分布の比較。

生成用薄膜標的で減速され、加速 Mu<sup>-</sup> と同じエネルギーとなった  $\mu^+$  は加速実験において深刻なバックグラウンドとなる。そこで診断ビームラインに設置した偏向電磁石を用いて、極性と運動量を選別することによりバックグラウンドを抑制した。また予備実験同様 TOF の情報も積極的に活用し、加速 Mu<sup>-</sup> ビームを明確に同定した。Fig. 4 に RFQ の RF パワーを on/off した場合での TOF 測定結果を示す。加速 Mu<sup>-</sup> ビームの測定強度は予備実験で測定した Mu<sup>-</sup> ビーム強度からの予想と合致しており、Mu<sup>-</sup> 生成による冷却過程及び RFQ による再加速の過程がよく理解できていると考えられる。この結果は投稿論文 [3] として掲載されている。

#### 3. LINAC 18 での成果発表

以上の成果について、2018 年 9 月 16 日から 21 日にかけて中国・北京で開催された国際会議 LINAC 18 にて研究発表を行った [4]。この会議における口頭発表は招待講演のみのため、本研究発表は通常セッション及び学生セッションにてポスター発表として行った。この学生セッションにお



Fig. 5 Student poster award 受賞時の様子。

いて本研究発表は二段階の審査を経て、Student poster award, first Prize を受賞した。受賞に伴い、表彰と合わせて 20 分間の特別受賞講演（招待講演扱い）を行う機会を得ることができた。Fig. 5 に Student poster award 受賞時の写真を示す。

#### 4. まとめ

高エネルギー加速器科学研究奨励会研究助成・国際交流助成により、国際会議 LINAC 18 にて世界初となるミュオン RF 加速実証実験の結果について研究発表を行った。会議では通常セッションと学生セッションにてポスター発表を行い、特に学生セッションにて Student poster award を受賞した。これに伴い表彰時に特別招待講演として 20 分間の口頭発表を行う機会を得ることができた。

#### 謝辞

本研究は J-PARC MLF 課題番号 2016A0067、2017A0263 として実施された。実験準備に関して MLF ミュオン科学系グループの多大な協力を受けた。また 理研 RAL 支所及び KEKB リニアックグループにも実験機器の利用についてご協力頂いた。この場をお借りして改めて感謝したい。本研究は JSPS 科研費 JP25800164、JP15H03666、JP15H05742、JP16H03987、JP16J07784、JP16K13810、18H03707 の助成を受けたものである。最後になるが、今回の助成により伝統ある国際会議で研究発表を行う機会を得ることができ、

さらには受賞の榮譽も得られた。改めて御礼申し上げます。

#### 参考文献

- [1] T. Mibe *et al.* edit., J-PARC E34 Conceptual Design Report, Technical Design Report (2011).
- [2] Y. Kondo *et al.*, “Re-acceleration of ultra cold muons in J- PARC muon facility”, Proc. of IPAC’18, Vancouver, Canada, FRXGBF1, pp. 5041–5046 (2018).
- [3] S. Bae *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams, **21**, 050101(2018).
- [4] R. Kitamura *et al.*, “Muon acceleration test with the RFQ towards the development of the muon linac”, in Proc. LINAC 18, Beijing, China, TUPO010 (2018).

## 環境によって異なるミュオニウムラジカルを与える有機分子の精密 $\mu$ SR 解析

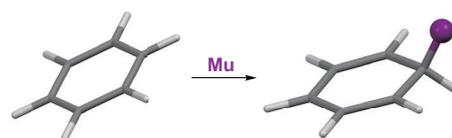
東京工業大学  
物質理工学院  
伊藤 繁和

2018年9月17日から24日まで、カナダ・バンクーバーの TRIUMF サイクロトロン実験施設にて、アントラセン型有機分子へのミュオニウム付加体の観測実験を行ってきました。今回の実験に対しまして高エネルギー加速器科学研究奨励会から助成を得られたことに対しまして深く感謝申し上げます。得られた成果につきまして報告をさせていただきます。

### 1. 緒論：ミュオニウムと有機分子

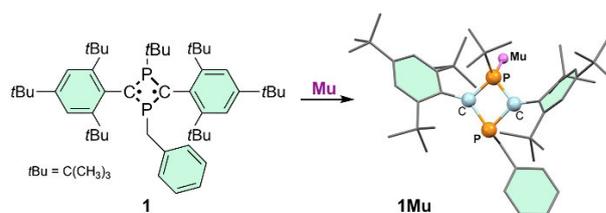
陽子加速器から生成するミュオン（ミュー粒子、 $\mu^+$ ）は寿命 2.2  $\mu$ s の素粒子で、運動方向に 100% スピン偏極している状態として得られる。ミュオンを絶縁体または半導体に打ち込むと、運動エネルギーを失っていきながら物質内の電子を捕獲し、ミュオンと電子との束縛状態である水素原子状のミュオニウム ( $\text{Mu} = \mu^+e^-$ ) を与えるようになる。ミュオニウムは原子や電子と非弾性散乱をくり返していき、エネルギーが 13.5 eV より小さくなると、ミュオニウムの状態が安定となる。ミュオニウムはさらに格子との衝突によってエネルギーを失うことで周りと同熱平衡になって、最終的に物質中で安定な位置に落ち着く<sup>[1]</sup>。

水素原子状のミュオニウムは、不飽和結合をもつ有機分子と付加反応を起こし、対応するラジカルを与えることができる。たとえばベンゼンの場合、Scheme 1 に示すようにシクロヘキサジエニルラジカルを与える<sup>[2]</sup>。近年では、合成化学技術の発展に伴い、通常では得られない高反応活性な化学種も安定に単離できるようになっているが、そういった特異な有機分子についてもミュオニウム付加体の観測が行われるようになっている。



Scheme 1

最近筆者が行った研究として、構造式 **1** で示される開殻一重項リン複素環化合物のミュオニウム付加反応を挙げる。**1** は本来極めて反応性の高い二つのラジカル部位が隣接するリン原子の電子効果と立体サイズの大きな有機置換基によって高度に安定化されており、室温・空气中で安定である。また **1** は、低いしきい値電圧で p 型半導体特性を示す。この **1** にミュオン照射を行うと、Scheme 2 に示すように、ミュオニウムがリン原子に付加した **1Mu** が生成することを、固体試料を用いたミュオン準位交差共鳴 ( $\mu$ LCCR, Figure 1)<sup>[3]</sup> によって観測することに成功している<sup>[4]</sup>。興味深いことに、分子に 3 つ存在するベンゼン環にミュオニウムが付加したラジカルは観測されていない。すなわち、ミュオニウムは本質的に反応性の高い 4 員環の部分に高い選択性をもって付加していることがわかる。また、**1** の 4 員環部分は比較的分極したリン-炭素結合で形成されており、正電荷を帯びたリン原子にミュオニウムが付加しやすい性質を反映していると考えられる。



Scheme 2

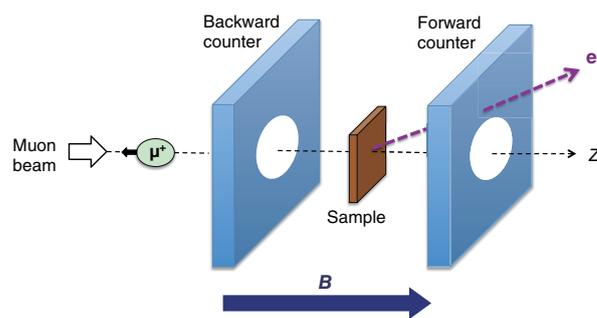


Figure 1

1のような特異な複素環分子にラジカルが反応するケースは、これまで幾つか見出されていた。しかし、その生成物の同定は極めて困難であった。これは、1は多くの有機置換基が密集した構造をもっているために、反応が複雑になってしまうためである。1Muを観測できたことは、「軽い水素原子」に相当するミュオニウムの反応を利用したことと、10 ns程度で完了するラジカル反応を効率的に同定するには、寧ろミュオンが最適であることを示す成果といえる。

## 2. アントラセン型分子

三つのベンゼン環が縮環した直線形の芳香族化合物であるアントラセン2の骨格炭素原子を他の元素で置き換えた化合物が多く知られている。しかし、3のように、リンのような周期表の第三周期以降の元素を含むアントラセン型化合物は基本的に不安定で、通常は単離同定が非常に困難である。筆者らは、3の不安定性を引き起こしている原因と考えられる高い反応性部位を、分子レベルの電子効果と立体効果を活用して安定化することを試みた。検討の結果、フッ素化されたアルキル基を不安定部位の近傍に導入することで、大気中安定に取り扱い可能な誘導体4を黄色固体として得ることができた。大気安定なアントラセン型化合物4を合成することができたことで、基本物性の測定を容易に行うことができるようになった。検討の結果、アントラセン2と同じような性質、たとえば蛍光発光を示すことが明らかになっている (Figure 2)。また、もう一つの置換基であるRを

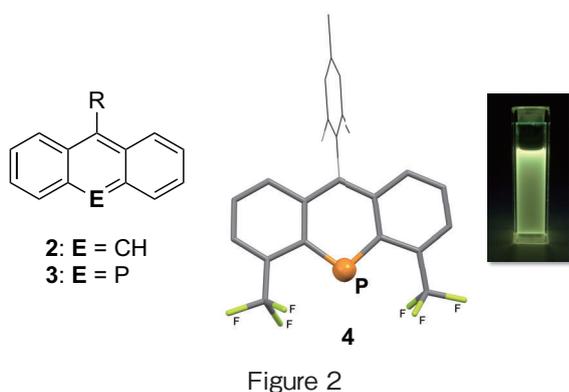


Figure 2

工夫することで、同一分子でありながら分子配列の異なる結晶を与える、結晶多形を示す誘導体を得ることができる<sup>[5]</sup>。

合成単離できる4は、不飽和結合の組み合わせとなっている分子構造を有している。よって、ミュオニウムが付加できる可能性が高く、新しいラジカル種を見出すことができると考えられる。

## 3. アントラセン型分子の $\mu$ SR 測定実験

### 3-1. これまでの知見

アントラセン型分子4の固体およびテトラヒドロフラン (THF) 溶液試料を用い、1.5 T程の磁場を印加する条件で横磁場ミュオン回転<sup>[6]</sup> (TF- $\mu$ SR, Figure 3) スペクトルを測定した。その結果、220~260 MHz程度 of ミュオンと電子の超微細結合定数 ( $A_{\mu}$ ) が観測されたが、固体試料と溶液試料では比較的大きな差が見られた。そのため、固体状態と溶液状態では4にミュオニウムが付加する位置が異なる可能性が示唆された。

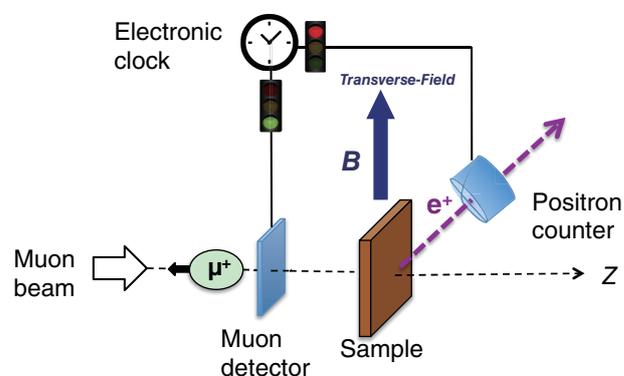


Figure 3

最も熱力学的に安定と考えられる、4のリン上にミュオニウムが付加したラジカル密度汎関数法 (DFT) 計算で  $A_{\mu}$  を見積もったところ、実験で得られた値と比較的ずれが大きい結果となった。一方で、4の両脇に位置するベンゼン環にミュオニウムが付加したラジカルは、熱力学的に不利な構造ではあるものの、その  $A_{\mu}$  は比較的实验で得られた値に近い結果となっていた。

### 3-2. 今回の測定実験と解析

4 の THF 溶液試料にミュオン照射を行い、TF- $\mu$ SR および  $\mu$ LCR 測定によってミュオニウム付加体の観測と同定を試みた。実験は TRIUMF の M15 ビームラインに Helios 分光計 (Figure 4) を設置して行った。Helios 分光計は最大 7 T までの外部磁場を印加できる超伝導磁石を備えた装置で、これまで数多くの有機分子へのミュオニウム付加反応の解析に利用されている。



Figure 4. Helios 分光計<sup>[7]</sup>

まず、TF- $\mu$ SR 測定によってミュオニウム付加体の確認を行った。今回用意した試料の濃度が低かったためにシグナルが比較的弱かったものの、230 MHz 程度の  $A_{\mu}$  を示すシグナルを観測できたことから、4 のミュオニウム付加体が生成していることを確認することができた。

続いて、等方性の溶液試料を用いて  $\mu$ LCR 測定を行うこととした。詳細は文献<sup>[8]</sup>に譲るが、等方性試料の  $\mu$ LCR では、ミュオンと電子の超微細結合定数  $A_{\mu}$  がわかっているならば、生成するラジカルにおける電子と核スピンの結合定数 ( $A_{\mu}$ ) を求めることができる。実際に測定を行ったところ、0.4–0.5 T 付近に共鳴シグナルが一カ所観測された。等方性試料では一般にミュオンと電子の超微細結合定数を示す共鳴シグナルは現れないが、今回の測定でも、先程示した  $A_{\mu} = 230$  MHz を示す

共鳴シグナルは観測されなかった。

この  $\mu$ LCR 測定の結果は、4 にミュオニウムが付加して生成するラジカルでは、有意な電子と核スピンの超微細結合定数が一つのみ存在することを示している。3 にミュオニウムが付加して生成するラジカルとしてその条件を満たす構造は、4 のリン上にミュオニウムが付加した **4Mu**、ということになる。しかし、先にも述べたように、DFT 計算によって最適化された **4Mu** の  $A_{\mu}$  は、実験値から求められた 230 MHz という超微細結合定数と比べて比較的ずれが大きいことがわかっている。DFT 計算の条件を幾つか変えて検討してみたものの、これまでに実施したレベルの計算で得られた **4Mu** の構造はいずれも、測定実験から求められた超微細結合定数とずれが大きい結果となっている。なお、実際の DFT 計算による構造最適化では、ミュオニウムの代わりに水素原子を用いており、見積もられたプロトンの超微細結合定数にプロトンとミュオンの相対磁気回転比 (3.183) を乗じて得ている。同位体効果を考慮した構造の修正を考慮しても、実験で求められた  $A_{\mu}$  と比べて依然ずれが大きい。現在、**4Mu** の最適化構造をもとにした構造パラメータの修正等も行いながら、4 のミュオニウム付加体の構造同定を進めている。

### 4. 結語

今回の測定実験では、溶液状態でのアントラセン型分子 4 にミュオニウムが付加反応を起こして生成するラジカルについて新たな知見が得られた。実験データから定性的に導き出された分子構造は **4Mu** であるが、DFT 計算の最安定構造から見積もられる超微細結合定数と比べてずれが大きい。今後さらに検討する必要があるが、ミュオンからミュオニウムが生成し、ミュオニウムが付加するプロセスにおいて未解明の現象が含まれている可能性も考えられる。今回用意できた 4 の量が固体状態での測定に不十分で、満足できる解像度の実験データが得られなかった。4 の合成においてはスケールを上げることが難しいことが背景に

あるが、これは有機合成化学に携わる筆者が解決しなければならない課題である。今回の成果をもとに、今後、素粒子科学と有機合成化学を融合させた斬新な機能性物質の探索等を進めたいと考えている。

最後に、本実験をサポートして頂いた小嶋健児氏と McKenzie, Iain 氏をはじめ、TRIUMF のスタッフの方々と、合成実験を担当して頂いた学生諸子に厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- [1] 西田信彦、「 $\mu$ SR」、小林俊一 編「物性測定の進歩〈1〉第2章、丸善 1997.
- [2] a) E. Roduner, *The Positive Muon as a Probe in Free Radical Chemistry (Lecture Notes in Chemistry 49)* Springer, Berlin, **1988**. b) E. Roduner, G. A. Brinkman, P. W. F. Louwrier, *Chem. Phys.* **1982**, *73*, 117.
- [3] a) P. W. Percival, B. Addison-Jones, J.-C. Brodovitch, S. Sun-Mack, *Appl. Magn. Resn.* **1996**, *11*, 315. b) ミュオンの進行方向に平行な外部磁場を印加し、ミュオンが崩壊して生成する陽電子 ( $e^+$ ) を、試料の前後に設置したカウンターで「アシンメトリー」として観測する。ミュオン、電子、および核スピンの変化が生じるとその陽電子数比が変化し、「共鳴」シグナルとして観測される。
- [4] S. Ito, Y. Ueta, K. Koshino, K. M. Kojima, I. McKenzie, K. Mikami, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *57*, 8608.
- [5] S. Ito, K. Koshino, K. Mikami, *Chem. Asian J.* **2018**, *13*, 830.
- [6] ミュオンの進行方向に垂直な外部磁場を印加する方法で、ミュオニウム付加体の場合、生じる歳差運動（回転）を陽電子カウンターで観測する。
- [7] <http://muquip.triumf.ca/spectrometers/helios>
- [8] J. Blundell, *Chem. Rev.* **2004**, *104*, 5717.

# 高温超伝導線材の電氣的接合抵抗における層間抵抗の測定手法開発

東北大学大学院工学研究科  
量子エネルギー工学専攻  
早坂 遼一路

## 1. 導入

高温超伝導線材として応用が期待されている REBCO (Rare-earth Barium Copper Oxide) 線材は図 1 (a) のような積層構造をもつ。現状、REBCO 線材の km オーダーの長尺化は難しく、コイルやケーブルへの応用には線材の接合が必要である。しかし、この線材を図 1 (b) のように面同士で接合すると、層と層の界面に存在する電気抵抗 (層間抵抗) が主な要因となり、接合抵抗が生じる。図 1 (b) では電流は各線材の銅層と銀層を通過し REBCO 層に流れ込む。そのため層間抵抗には銅 / 銀層間と銀 / REBCO 層間の抵抗が含まれる (以下それぞれの和を層間抵抗と呼ぶ)。重要な問題は、線材メーカーや線材の製造番号、さらにテープの位置によって層間抵抗にばらつきがあり、接合抵抗が許容値に対して無視できないレベルでばらつくということである [1]。ゆえに、応用機器の設計のため接合抵抗を見積もり、低接合抵抗を安定的に実現するためには、線材の接合箇所の層間抵抗を事前に測定してから接合することが望ましい。

しかし、従来用いられてきた層間抵抗の測定手法では線材を部分的に破壊し、電圧プローブを接合するため、層間抵抗を評価した後の線材を接合

に使用することが出来ない。さらに、線材の加工は層間抵抗の評価値に大きなばらつきを与えると考えられる。そこで本研究では、REBCO 線材の層間抵抗を非破壊的に、かつ高確度で評価するために、新しい手法を提案し従来法との比較を行った。

## 2. 方法

### 2.1. 従来の Current transfer length (CTL) 法

従来の層間抵抗測定手法である Current transfer length (CTL) 法 [2] (以下、従来法) の概略図を図 2 に示す。従来法では、剥離させた銅層 [3] から供給した電流が、REBCO 層に転流する領域での電圧降下を測定することで層間抵抗を評価する。電圧降下は次式で表される。

$$V(x) = V_0 \exp(-x/\lambda), \quad \lambda = (r \cdot h_{Cu} / \rho_{Cu})^{1/2} \quad (2-1)$$

ここで、 $V_0$  は  $x = 0$  における電圧、 $r$  は層間抵抗 ( $\Omega m^2$ )、 $h_{Cu}$  は銅層の厚さ、 $\rho_{Cu}$  は銅層の電気抵抗率 ( $\Omega m$ ) である。電圧測定により転流距離  $\lambda$  (m) を求め、次式で層間抵抗を求める。

$$r = \lambda^2 (\rho_{Cu} / h_{Cu}). \quad (2-2)$$

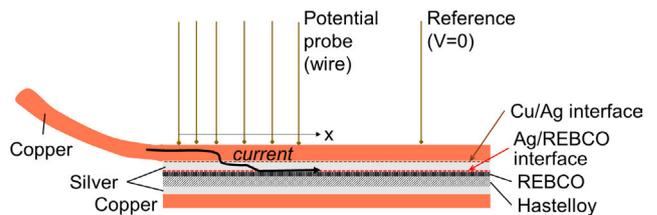
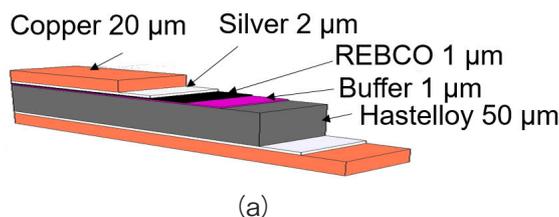
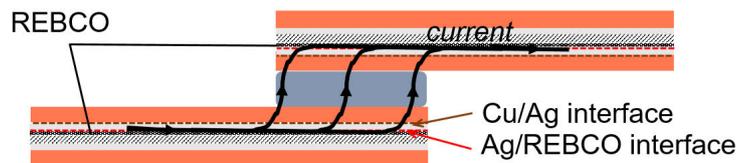


図 2 従来の CTL 法の概略図



(a)



(b)

図 1 (a) REBCO 線材の構造 (b) 2 枚の REBCO 線材を面同士接合したときの概略図

## 2.2. Contact probing CTL 法

本研究で提案する Contact probing CTL 法（以下、新手法）の概略図を図3に示す。電流供給と電圧測定をコンタクトピンで行うことで、線材を破壊することなく層間抵抗を評価できる。また、電圧プローブの接合が不要であり、プローブ位置のずれによる測定のばらつきを抑えることが出来る。一方、従来法と異なり、電圧降下の理論解を得ることが出来ないため、層間抵抗の評価は実験で得られる電圧降下と数値計算によって得られる電圧降下を比較することで行う。具体的な比較方法の検討のため、3次元有限要素法により静電場解析を行い、電圧分布を計算した。電流リード間（間隔1mm）の線材銅表面における電圧降下の計算結果を図4に示す。図4は電圧降下の線形領域（ $0.05\text{ mm} < x < 0.4\text{ mm}$ ）の傾きが層間抵抗の値によって決まることを示している。電圧降下の線形領域の傾きの逆数 $\lambda$ （従来法の転流距離に相当）と、層間抵抗の関係を図5に示す。新手法における層間抵抗評価は、まず実験で電圧降下を

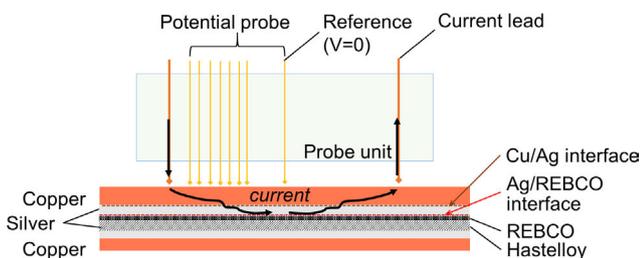


図3 Contact probing CTL 法の概略図

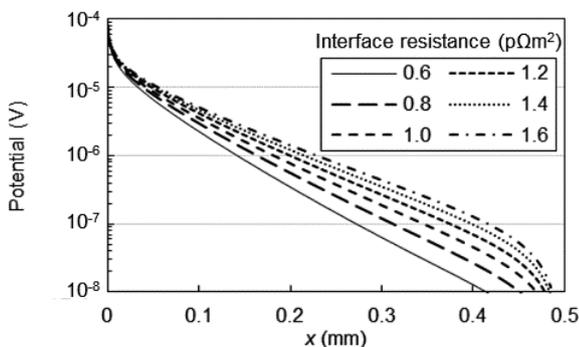


図4 新手法における電流リード間電圧降下。異なる層間抵抗に対する数値解析の結果。 $x = 0$ が片方の電流リードに相当する。

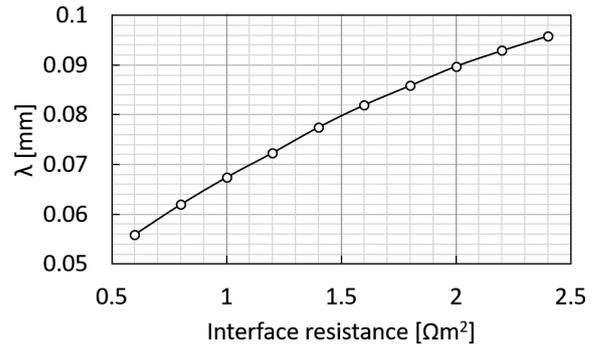


図5 層間抵抗と $\lambda$ の関係。例えば、実験で測定した電圧降下から求めた $\lambda$ が $0.07\text{ mm}$ のとき、 $\lambda = 0.07$ と曲線との交点の横軸の値 $1.1\text{ p}\Omega\text{m}^2$ が層間抵抗の評価値となる。

測定し $\lambda$ を求める。次に、その $\lambda$ が図5の縦軸の値となる曲線上の点の横軸の値を層間抵抗の評価値とする。

## 3. 実験

本実験では SupowerPower 社製の $4\text{ mm}$ 幅 REBCO 線材を使用した。従来法のサンプルとして3つのサンプル（同一線材から $3\text{ cm}$ 程度切り出した）A1~A3を用意した。サンプルは銅層をかみそりで剥離した後、電圧プローブとして $25\text{ }\mu\text{m}$ の金線をワイヤーボンディングによって接合した。電圧プローブの位置は顕微鏡を用いて測定した。実験は液体窒素中 $77\text{ K}$ で行い、 $30\text{--}50\text{ A}$ の直流を剥離させた銅層から供給し、各電圧プローブと参照プローブ（図2中、Reference）間の電圧を測定した。

Contact probing CTL 法の実験のために図6に示すプローブユニットを設計した。このプローブユニットには $50\text{ }\mu\text{m}$ 径の電流リード2本と $30\text{ }\mu\text{m}$ 径の電圧プローブ8本が装備されている。電圧プローブのは片側の電流リードより $80\text{ }\mu\text{m}$ の点から $50\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で配置されている。新手法で測定するサンプルとして4つのサンプルB1~B4を準備した。サンプルをプローブユニットの図6における上面に設置した後、液体窒素中で電流リードから $0.5\text{ A}$ の直流を供給し、各電圧プローブと参照プローブ間（図3参照）の電圧を測定した。

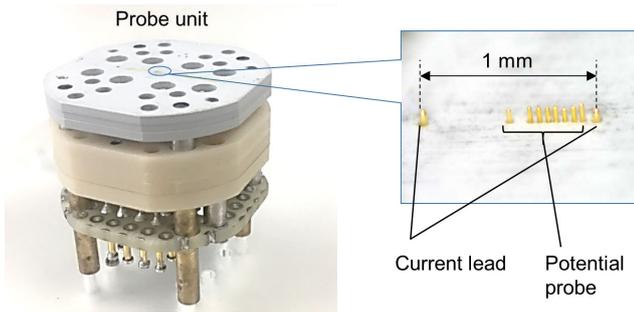


図6 新手法で使したプローブユニット

#### 4. 結果と考察

サンプル A1~A3 の従来法による電圧測定結果を図7に、サンプル B1~B4 の新手法による電圧測定結果を図8に示す。新手法の結果（図8）の方が従来法の結果（図7）より指数的な電圧降下が明確に観察された。新手法において、ワイヤーボンディングの位置ずれや、銅層の剥離による超伝導層のダメージなどが与える影響を排除できたと考えられる。次に、図7、8のそれぞれのサンプルごとに近似直線の傾きの逆数 $\lambda$ とその推定誤差を算出した。従来法の測定に対しては式(2-2)において、 $\rho_{Cu} = 3.26 \text{ n}\Omega\text{m}$ 、 $h_{Cu} = 20 \text{ }\mu\text{m}$ として層間抵抗を評価した。新手法の測定に対しては、求めた $\lambda$ と図5より2.2節で述べた方法にしたがって層間抵抗を評価した。図9にすべてのサンプルの層間抵抗の評価値を示す。従来法で評価された層間抵抗は平均して  $2.4 \text{ p}\Omega\text{m}^2$ 、新手法で評価された値は平均して  $1.05 \text{ p}\Omega\text{m}^2$  であり、新手法の評価値の方が従来法の評価値より小さい。従来法による評価値の方が文献値 [3] に近いが、層間抵抗としては新手法による評価値の方が妥当と考えられる。なぜなら、線材2枚分の層間抵抗が接合抵抗に含まれるが、はんだ接合の抵抗は  $4 \text{ p}\Omega\text{m}^2$  を下回ることがある [4]-[7] ため、従来法による評価値は線材1枚分の層間抵抗としてはやや大きく、新手法による評価値は妥当であるからである。さらに、新手法では従来法よりも層間抵抗の推定誤差（図9中エラーバー。 $\lambda$ の推定誤差に起因する。）が小さいことが確かめられた。新手法で線材の加工を回避できたことにより、信頼性の

高い層間抵抗評価が可能になったと考えられる。しかしながら、新手法においてサンプル B1 は他のサンプル B2~B4 より  $1 \text{ p}\Omega\text{m}^2$  大きく、同一線材でも位置によって層間抵抗が異なることが示唆された。

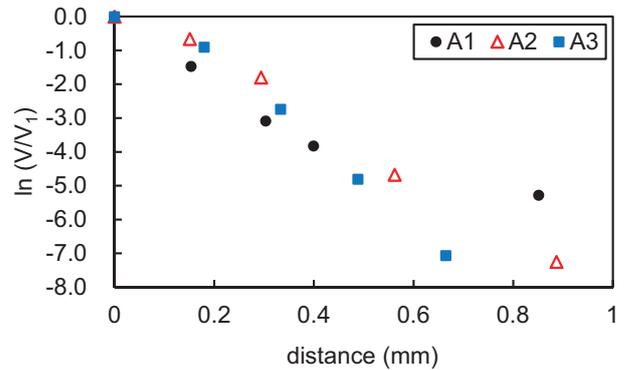


図7 従来法で測定した電圧降下。横軸ははじめの電圧プローブからの距離を表す。

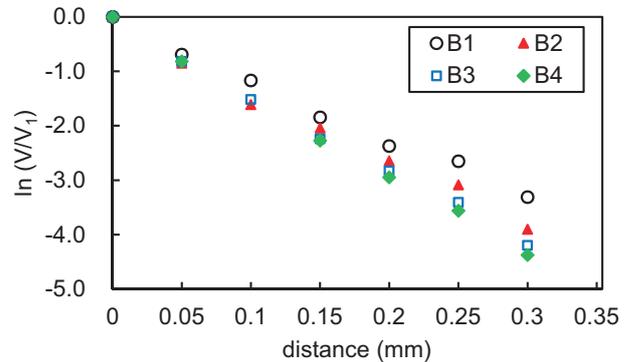


図8 新手法で測定した電圧降下。横軸ははじめの電圧プローブからの距離を表す。

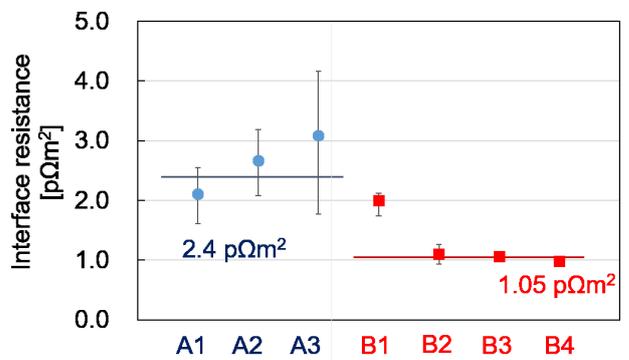


図9 従来法と新手法による層間抵抗の評価値の比較

## 5. 結論

本研究では REBCO 線材の層間抵抗を非破壊的かつ高確度で評価するため、Contact probing CTL 法を提案した。液体窒素中 77 K において従来法と新手法により同一の REBCO 線材の異なる位置の層間抵抗を評価し比較を行った。その結果、新手法の方が従来法よりも信頼性の高い層間抵抗値を評価できることを示した。また、同一線材でも位置によって層間抵抗が異なることが示唆された。線材の接合抵抗を見積もるためには接合領域内の複数点で層間抵抗を評価し、接合抵抗に寄与する実効的な層間抵抗を評価する必要がある。本研究で提案した Contact probing CTL 法は測定の容易さゆえ、複数点の測定に非常に適している。

今後は複数点測定の実験構築や、異なる温度や磁場下における層間抵抗の挙動を確かめる。また、異なる線材の層間抵抗も評価する予定である。本研究で提案した新手法により、REBCO 線材の層間抵抗を接合前に評価することで、接合抵抗の予測および低抵抗接合の安定的実現が可能になると期待している。

## 参考文献

- [1] Y. Kim et al., "YBCO and Bi2223 coils for high field LTS/HTS NMR magnets: HTS-HTS joint resistivity," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, Jun., 2013.
- [2] M. Polak et al., "YBCO/Ag boundary resistivity in YBCO tapes with metallic substrates," *Supercond. Sci. Technol.* vol. 19, pp. 817-820, 2006.
- [3] N. Bagrets et al., "Investigation of soldered REBCO tape-copper joints for superconducting applications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 4, Jun., 2016.
- [4] Jerome Fleitter, Amalia Ballarino, "In-field electrical resistance at 4.2 K of REBCO splices," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 27, no. 4, Jun., 2017.
- [5] S. Ito et al., "Structure and magnetic field dependences of joint resistance in a mechanical joint of REBCO tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4 Jun., 2016.
- [6] Jun Lu et al., "Lap joint resistance of YBCO coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* vol. 21, no. 3, pp. 3009-3012, Jun., 2011.
- [7] K. Konstantopoulou et al., "Effect of the axial stress and the magnetic field on the critical current and the electric resistance of the joints between HTS coated conductors," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, 064001, 2015.

## 第 35 回 高エネルギー加速器セミナー (OHO'18) 報告

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設  
小林 幸則

2018年9月4日～7日までの4日間にわたり KEK つくばキャンパス3号館セミナーホールにおいて、高エネルギー加速器セミナー OHO'18 が開催されました。

同セミナーは若手研究員の育成や、企業の研究者の加速器科学への理解を深める事を目的として、1984年以來毎年開催されているものです。

第35回目となる今年のセミナーは「大強度陽子加速器の現状と将来 –さらなる大強度ビームを目指して–」と題して、企業、研究所、技術者、大学などの研究者、大学院生、大学生など97名が全国から参加しました。

大強度陽子加速器 J-PARC が稼働を開始して、早くも10年が経過しました。

これまで様々な苦難を乗り越え、現在は世界最高レベルの陽子ビーム強度を実現しています。

今回のセミナーでは、その加速器の現状とさらなる大強度化を目指す将来について学びました。

講師の皆様の熱意が伝わり、参加者全員最後まで熱心に拝聴していました。

プログラムには施設見学もあり、電子陽電子入射器棟 (LINAC)、放射光施設 (PF リング)、そしてコンパクト ERL を見学しました。

また OHO の呼びものの一つである「夜話」(講義ではなく研究者の方の経験談などを伺う) では、筑波大学 医学医療系准教授 生命医科学域 陽子線医学利用研究センターより熊田博明氏にお越しいただき、BNCT –大強度小型粒子加速器が可能にする新しいガン治療–について、大変感慨深いお話しをしていただきました。

本講義で使用されたテキストは以下のリンクよりご覧頂けます。

<http://accwww2.kek.jp/oho/oho18/index.html>

<http://accwww2.kek.jp/oho/oho18/text.html>



集合写真 (3号館エントランスにて)

## 第 8 回 特別講演会開催報告

1. 開催日時 平成 30 年 10 月 10 日 (水) 14:00 ~ 17:00 . . . . 49 名の参加

2. 開催場所 アルカディア市ヶ谷 (私学会館) 7 階 琴平  
住所 東京都千代田区九段北 4-2-25  
TEL 03-3261-9921 (代表)

### 3. 演 題 等

講演. 1 「世界で幅広く展開する超伝導加速器の現状と将来」  
講演者 加古 永治 氏  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設 教授

講師略歴 1988 年 4 月高エネルギー物理学研究所に着任し、トリスタン計画用 508MHz 超伝導加速空洞の建設に従事。  
以来、一貫して高加速電界応用の L バンド超伝導加速空洞システムの研究開発に従事。  
2000 ~ 2005 年 ADS 用 972MHz クライオモジュールの開発、2005 年よりリニアコライダー用 1.3GHzSTF クライオモジュールの開発、2008 年よりエネルギー回収型線形加速器 (ERL) 用 1.3GHz 入射器クライオモジュールの開発に従事し、現在に至る。  
2015 年より大強度陽子線形加速器用低ベータ型超伝導空洞の研究開発に着手するとともに、理研・和光の QWR 型超伝導空洞の開発、QST・六ヶ所の HWR 型超伝導空洞の開発に、共同研究者として参加。  
2013 年 4 月より現職。

講演要旨 1980 年代後半に世界初の超伝導空洞の量産・実用化に成功した KEK トリスタン計画を経て、その後 30 年間での高加速電界・高 Q 値の達成を目指した数々の技術開発の成果により空洞性能が著しく向上した結果、近年、超伝導空洞を利用した加速器の建設、将来計画が世界で数多く進行中である。  
ヨーロッパでは E-XFEL が完成し、ESS が建設中であり、アメリカでは LCLS-II と FRIB が建設中である。  
また、中国や韓国でも超伝導空洞を用いた複数の計画が進行中である。  
本講演では、超伝導空洞の高性能化の現状、現在建設中の超伝導加速器を紹介し、今後期待される将来計画について、報告する予定である。



加古 永治 氏  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
加速器研究施設 教授

講演. 2 「いよいよ始まった宇宙の起源を探る SuperKEKB/Belle II 実験」  
講演者 宇野 彰二 氏

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所 副所長・教授

講師略歴 名古屋大学理学研究科にて素粒子の実験的研究で理学博士  
卒業後、高エネルギー物理学研究所に着任し、2018年4月より現職  
長年にわたって素粒子実験に携わってきており、特にガス放射線検出器の専門家として、TRISTAN/TOPAZ 実験のエンドキャップガスサンプリングカロリメーターとトリガーチェンバー、KEKB/Belle 実験の中央飛跡検出器、SuperKEKB/Belle II 実験の中央飛跡検出器などを設計、製作してきた。  
2011年に「マイクロパターンガス検出器による中性子・X線画像装置の開発」で高エネルギー加速器科学研究奨励会・小柴賞を受賞。

講演要旨 2008年に小林誠・益川敏英両先生がCP対称性の破れの理論的研究でノーベル物理学賞を受賞された。  
その小林・益川理論を実証したのが、高性能なKEKB加速器と巨大なBelle測定器であった。

Belle 実験では他の数々の物理成果も上げてきたが、性能を飛躍的に向上させるために、2010 年以降、加速器、測定器ともに大幅な改造を行ってきた。

2018 年 4 月からデータ収集が始まった加速器 (SuperKEKB) と測定器 (Belle II) を用いた実験の改良ポイント、特にナノビーム衝突に関する説明を行うと同時に、Belle II 実験の現状を報告する。

また、素粒子の世界で成功を収めている標準理論を超える物理をどのように探索していくかを説明し、そのことが現在の宇宙が物質優位であることを証明する鍵が得られる可能性があることを講演する。



宇野 彰二 氏  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所 副所長・教授

・講演の詳細につきましては、奨励会ホームページ (<http://www.heas.jp>) をご覧ください。

## (公) 高エネルギー加速器科学研究奨励会賛助会員一覧

平成 30 年 11 月 1 日現在

	会員名		会員名
1	エーザイ (株)	31	日本アドバンステクノロジー (株)
2	S.P. エンジニアリング (株)	32	日本高周波 (株)
3	(株) 大阪真空機器製作所	33	日本電磁工業 (株)
4	川崎設備工業 (株)	34	(株) 野村鍍金
5	(株) 関電工	35	浜松ホトニクス (株)
6	金属技研 (株)	36	日立金属 (株)
7	工藤電機 (株)	37	(株) 日立製作所
8	(株) ケーバック	38	VAT (株)
9	小池酸素工業 (株)	39	富士通 (株)
10	(株) 工業ゴム研究所	40	武州ガス (株)
11	神津精機 (株)	41	(有) 双葉工業
12	コカ・コーライーストジャパン (株)	42	(株) マイテック
13	(株) ジェック東理社	43	(株) 前川製作所
14	秀和電気 (株)	44	三菱重工機械システム (株)
15	新日鐵住金 (株)	45	三菱電機 (株)
16	セイコー・イージーアンドジー (株)	46	三菱電機システムサービス (株)
17	大陽日酸 (株)	47	太陽計測 (株) 平成 30 年度休会
18	(株) 多摩川電子		
19	ツジ電子 (株)		
20	(株) 電研精機研究所		
21	東京ニュークリアサービス (株)		
22	東芝エネルギーシステムズ (株)		
23	キャノン電子管デバイス (株)		
24	(株) トヤマ		
25	豊田通商 (株)		
26	長瀬ランダウア (株)		
27	ニチコン (株)		
28	ニチコン草津 (株)		
29	日新パルス電子 (株)		
30	(株) 日本アクセス		

## 評議員・役員等一覧

平成 30 年 11 月 1 日現在

### 評議員

氏 名	所 属
ながしま よりきよ 長島 順清	大阪大学 名誉教授
や の やすしげ 矢野 安重	仁科記念財団 常務理事
よこみぞ ひであき 横溝 英明	一般財団法人総合科学研究機構理事長 兼 中性子科学センター長
おおの ひでお 大野 英雄	(財) 高輝度光科学研究センター 研究顧問
はかまだ としかず 袴田 敏一	浜松ホトニクス株式会社 顧問
さとう きよかず 佐藤 潔和	東芝エネルギーシステム株式会社 京浜事業所 技監

任期 平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 27 年 5 月 19 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

### 役員（理事）

役 職	氏 名	所 属
代表理事	たかさき ふみひこ 高崎 史彦	高エネルギー加速器研究機構 先端加速器推進部 研究員
業務執行理事	かみや ゆきひで 神谷 幸秀	高エネルギー加速器研究機構 理事
理 事	あさの かつひこ 浅野 克彦	株式会社日立製作所 日立事業所 主管技師長
理 事	くまがや のりたか 熊谷 教孝	国立研究開発法人科学技術振興機構未来社会創造事業 プログラムマネージャー
理 事	うえさか みつる 上坂 充	東京大学大学院工学系研究科 原子力専攻原子炉工学講座 教授

任期 平成 28 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 29 年 5 月 12 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

## 役員（監事）

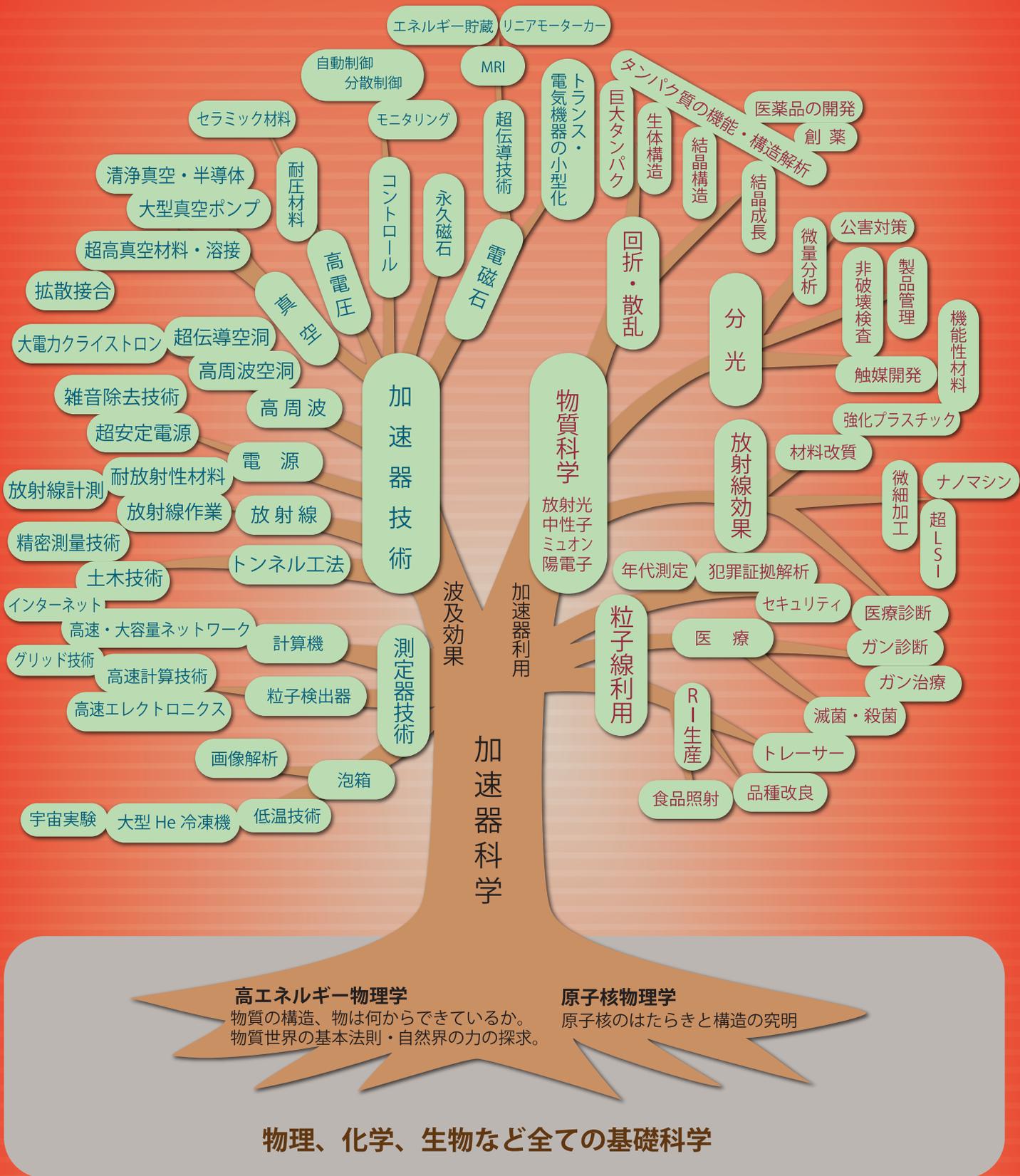
役 職	氏 名	所 属
監 事	きむら よしたか 木村 嘉孝	高エネルギー加速器研究機構 顧問

任期 平成 26 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結時（平成 27 年 5 月 19 日）から平成 30 年度の最終のものに関する定時評議員会の終結の時（平成 31 年 5 月下旬）までとする。

## 選考委員会委員

氏 名	所 属
やまぐち せい や 山口 誠哉	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 施設長
かみがいと おさむ 上垣外 修一	理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器基盤研究部 部長
はせがわ かずお 長谷川 和男	国立研究機関法人 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター加速器デビジョン デビジョン長
はぼ じゅんじ 幅 淳二	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授
やまなか たく 山中 卓	大阪大学 大学院理学研究科 教授
なかや つよし 中家 剛	京都大学 大学院理学研究科 教授
ながえ ともふみ 永江 知文	京都大学 大学院理学研究科 教授
きのした とよひこ 木下 豊彦	公益財団法人 高輝度光科学研究センター利用推進部 部長

任期 平成 29 年 4 月 1 日から平成 31 年 3 月 31 日までとする。



**発行** 公益財団法人  
**高エネルギー加速器科学研究奨励会**  
 〒305-0801  
 つくば市大穂 1-1 高エネルギー加速器研究機構内 (職員会館 2F)  
 TEL・FAX : 029-879-0471  
 E-mail : info@heas.jp  
 URL : http://www.heas.jp/