



季刊誌

2017

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

NO. 07

特集

μ SR

- ミュオンのスピンドルで見る -

J-PARC/MLF ミュオンSライン

二つの世界をミュオンで見る

「新しい検出器で、新しい世界を拓く」

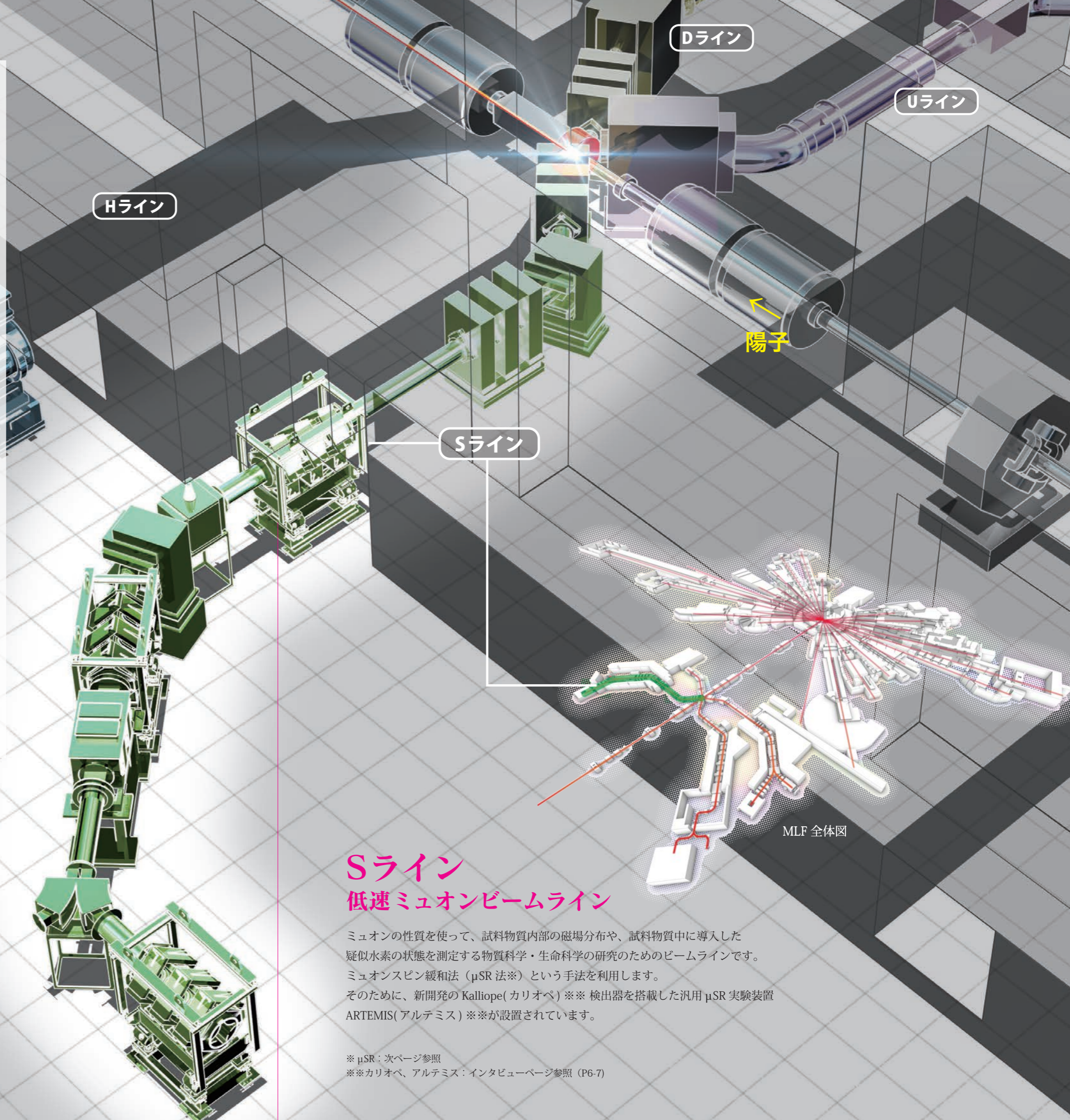
小嶋 健児

ミュオン(μ)って何?

ミュオンは素粒子の一種で、第2世代のレプトンです。粒子であるミュオンは負の電荷(-e)、その反粒子は正の電荷(+e)を持ちます。ミュオンの寿命は2.2マイクロ秒(100万分の2.2秒)と非常に短く、正のミュオンは陽電子、反ミューニュートリノ、電子ニュートリノに崩壊します。

ミュオンはスピン1/2を持っており、また加速器で通常得られるエネルギーでは、物質中にサブミリ~センチメートル程度の深さまで侵入出来るので、物質内部の磁場の情報を測定するマイクロプローブ(探針)として非常に強力なツールです。

		世代			
		I	II	III	
クォーク	電荷				
	スピン				
レプトン	+2/3	1/2	u	c	t
	-1/3	1/2	d	s	b
	-1	1/2	e	μ ミュオン	τ
	0	1/2	ν_e	ν_μ	ν_τ



J-PARC/MLF ミュオン S ライン

Sライン 低速ミュオンビームライン

ミュオンの性質を使って、試料物質内部の磁場分布や、試料物質中に導入した疑似水素の状態を測定する物質科学・生命科学の研究のためのビームラインです。ミュオンスピン緩和法(μ SR法※)という手法を利用します。そのために、新開発のKalliope(カリオペ)※※検出器を搭載した汎用 μ SR実験装置ARTEMIS(アルテミス)※※が設置されています。

※ μ SR: 次ページ参照
 ※※カリオペ、アルテミス: インタビューページ参照(P6-7)

MLF 全体図

二つの世界をミュオンで視る

① 加速器で生成されたパイ中間子 π^+ の崩壊から生まれる正のミュオン μ^+ のスピンの向きは、電弱相互作用の**パリティの破れ**※のため、100%そろっている。Sラインの正ミュオンの場合は、進行方向に対して完全に逆向きで、測定試料に到達する。

※鏡の中の世界と元の世界で物理法則が等しくないことを「パリティ対称性の破れ」という。弱い相互作用による粒子崩壊に登場するニュートリノには、片方のスピンしか存在しないのを原因として、スピンゼロのパイ中間子 π^+ が崩壊 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$) してできるミュオンのスピンは、一意に決まってしまう、 μ^+ の場合、進行方向逆向きである。

② 試料内部に導入されたミュオンは、磁場中のスピンのララー-歳差運動※で、その場の磁場にに応じた周波数でスピンの向きが変わる。

※外部磁場中のスピンが、傾きかけたコマの回転軸のように向きを変える運動。磁場の方向とスピンのなす角度は変わらないので、スピンの向きは円錐形を描く。

③ 正のミュオンが崩壊するときに、生成する陽電子はミュオンスピンの向いていた方向に放出される確率が最も高い。図中のうちわのような形は、ミュオンスピンに対する陽電子放出方向の角度分布。

ミュオンスピン回転 / 緩和 / 共鳴法
(μ SR : Muon Spin Rotation / Relaxation / Resonance)

ミュオンを使って物質内部の磁場分布をリアルタイムで測定する方法で、核磁気共鳴 (NMR / MRI) や電子スピン共鳴 (ESR) と並ぶ強力な物性研究手法。
物質中に導入した正のミュオンは、その場の磁場の方向に応じてスピンの向きが変わる。ミュオンが崩壊する際に放出される陽電子はスピンの向いている方向に出やすい。
この陽電子を観測し、ミュオンのスピンの向きの時間変化を測定することで、物質内部のミュオンの止まった位置の磁場分布を調べることができる。

物質の中の磁場を

視る

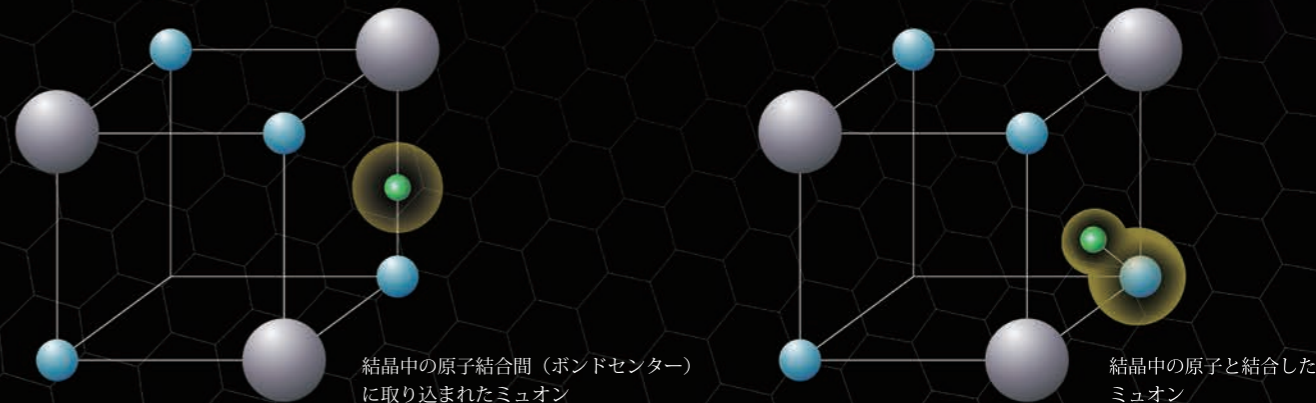
物質の中の水素を探る

正のミュオンは「軽い陽子の同位体」としてふるまう。また、物質中の正ミュオンが電子を1個捕まえて、電氣的に中性な水素の状態となった時には、特徴的なミュオンスピンの向きの時間変化と磁場依存性を示す。このことを利用して、不純物水素が機能において重要な役割を担っている半導体などの物質に、正のミュオンを導入し、 μ SRの手法を用いることで、その物質中の水素の役割を解明しようと試みている。

構成する原子の電気陰性度・物質の電気伝導度・バンド構造などを要素として、その物質中の不純物水素が取るべき電子状態は異なり、ミュオンを用いて実測することができる。



フラーレン (C60) の中に取り込まれたミュオンの中性水素状態。
このように、正ミュオンが電子を捕まえ、中性水素状態として結晶格子中の空間に取り込まれることもある。
黄色の球は、束縛された電子の軌道。





interview

小嶋 健児

Kenji Kojima

KEK 物質構造科学研究所 准教授

拓く。

ひら

新しい検出器で、新しい世界を

世界一の強度のミュオン に対応するために

-- カリオベってなんですか？

カリオベ※は検出器の略称です。J-PARCの世界最高強度の
パルスミュオンビームを余すところなく使うためには、従
来型の検出器では処理しきれないので、2010年に新型検出
器の開発チームを立ち上げて開発しました。カリオベの名
前は、開発チームの一員の幸田章宏さんが、ギリシャ神話
の神様の名前にちなんで命名しました。この名前には、仮
のオペレーションが続くが、常に改良を加え続けて良くなっ
て行く、という意味も含まれています。このカリオベ検出
器を40台ずらりと円周状に並べたシステムを搭載している
のが、μSR 実験装置アルテミス※です。

-- カリオベを開発するに至った経緯を教え てください

J-PARCのようなパルスビーム施設の場合、100ナノ秒くら
いの時間内に数万個のミュオンが一度に来て、それらが2.2
マイクロ秒の寿命で次々に陽電子に崩壊して行きます。KEK
※つくばにあった東大中間子実験施設もパルスミュオン源で
したが、ビーム強度が弱かったので、μSR 実験装置の検出

器は64チャンネルで十分でした。J-PARCではビーム強度
が100倍以上になったので、チャンネルの分割数もそれに
応じて増やす必要があります。しかし、既存の信号処理回路は
高価な上に、集密度が低い検出素子と処理回路が分かれて
います。既存の検出器のままだと価格的にもスペース的にも
J-PARCでは対応できないので、新規に開発せざるを得なかつ
たのです。世界の他のミュオン施設には、こんな小さく高密
度な検出器はありません。

-- カリオベ検出器の特徴は？

- ①大強度に対応可能で、②磁場の中でも使用可能で、③い
ろんな実験に柔軟性の高い汎用検出器だということです。
①に関して、既存の検出器では、検出素子1個当たり毎パ
ルス16個程度の陽電子しか捕まえられず、それ以上来ない
ようにビームを絞る必要がありましたが、カリオベは1000
個まで耐えられるように設計されています。
②に関して、カリオベ検出器では数テスラの磁場中で問題
なく動作するMPPC※という半導体光検出素子を使ってい
るので、従来の光電子増倍管と異なり磁場に強いです。信
号処理回路もコンパクトなので、磁場の発生する装置の中
まで持って行って測定できます。これは、実験装置の取り
扱いやすさを格段に改善しました。
③に関して、データ収集を行うファームウェアやプログラム
を書き換えると、ミュオンのみならず、中性子検出器のデー

タを読み取ることができるようになります。実際、最近
はカリオベを中性子イメージングに使う研究も始めています。

-- 開発に苦労した点はありますか？

いろいろありますが、一番大変だったのは、信号のアナログ
処理部分に起因する「信号のひずみ」です。大強度パルスビ
ームで使う検出器は多重ヒットに耐えなければならないので
すが、各ヒットの信号の影響がなるべく早く収束するよう
にアナログ回路ができていないと、簡単には補正できない
「信号ひずみ」になってしまいます。それを解決するために、
検出器に使っているASICと呼ばれるカスタムICを新しく
したり、それを制御するデジタル回路部分のファームウェア
を書き換えたりして対応しました。
こういう最先端の検出器技術は、大学院も含めてこれまでの
講義や学生実験等の教育課程には全く入っていないのです。
その一方で、J-PARCに限らず、衛星なり重力波検出装置な
り、いろんな巨大プロジェクトでは実地に「今すぐ」必要と
されている。だから、新しい技術を採用しながら、使い回
せる技術要素はどんどんオープンにして使い回そう、とい
う動きがあります。KEKを中心とする機関を超えたプロジェ
クト「Open-It」はその一つで、カリオベ開発では素粒子原
子核研究所と計算科学センターの方々に大変お世話になりま
した。現在のμSR 実験装置に組み込まれているカリオベ検出
器の最終版ができたのが、ようやく2016年の6月の話です。

-- 実験装置アルテミスの今後

検出器が完成した後、μSR 実験装置の性能は、試料の測
定環境にどれくらい多様性をもたせることができるかで決
まってきます。アルテミスは汎用検出器なので、必要に応じ
ていろいろな試料環境アタッチメントを付け加えられるの
が強みです。0.3 K (約-273℃)の極低温まで下げられる
冷凍機や、試料近傍にだけ磁場をかけられる小型電磁石も稼
働し始めています。また試料の大きさも、僕が学生の頃は
直径50mmくらい必要でしたが、現状では5mm角、厚
さ1mmまで小さくなりました。これでもまだ大きいので、
3mm角や1mm角くらいまで小さくしたいです。そこま
で小さくできたら大抵のものを測れるようになりますね。

ミュオンをつかった 研究

-- どういう経緯でミュオンに携わるよう になったのでしょうか？

大学生の頃は素粒子志望だったので、ちょっと変わつ
た分野に興味があったんです。物質科学では、銅酸化物高
温超伝導が発見されたばかりの頃で、同級生の多くがそち
らの分野に行きましたが、僕は人の行かない所に行こうと思
っていました。中でも、粒子の「スピン」に興味があって、い
ろんな本を読んだのですが、相対論補正から出て来るとか、
空間を1回転すると符号が反転するとか、性質が変でよく
分かりませんでした。一方で、実験は好きだから、スピン

ができる実験をやりたいと思っていたところに、ミュオン
の研究室(東大・永嶺研)を知って、そちらに進むことにし
ました。その後、カナダのTRIUMF 研究施設で実験したり、
アメリカのコロンビア大に行ったりして、博士課程くらい
まではμSR と中性子回折を使って、銅酸化物関連物質の一
次元スピン系物質などの研究をしていました。

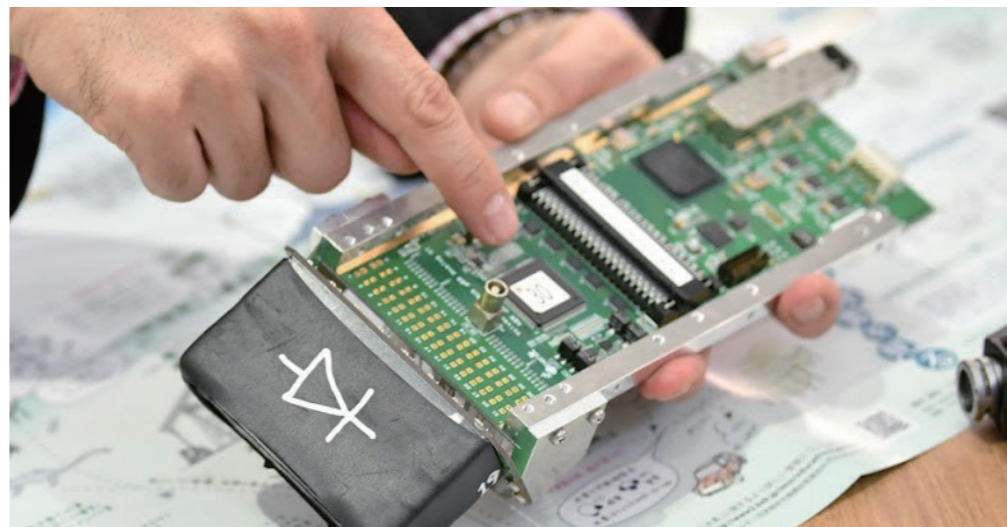
-- ミュオンで見たいもの、目指すもの

今の半導体技術を支えているのは、シリコンやガリウムヒ素
などの材料なのですが、その中の不純物水素が性能劣化にい
かに関わっているか分かってきています。ところが、スマ
ートフォンなどに使われる透明半導体など新しい材料が次々
と出てきていて、その中の水素の役割はまだ分かっていな
いのです。従来の半導体のように水素が必ずしも性能劣化
させるわけでもなく、場合によっては性能向上をもたらし
たり、機能において大事な役割を果たしている。ミュオン
を使うと、試料物質の中に導入した不純物水素の状態が簡
単にわかるので、いろいろな物質の水素状態を明らかにし
ていきたいですね。アルテミス自身、東工大元素戦略プロ
ジェクトの予算で大部分製作させて頂いたので、まさにそ
ういう目的の研究に使っていきます。また、ミュオンは多
数の試料を次々に測定して、磁気相図を作るのに役に立ち
ます。数年前に鉄ヒ素超伝導体の第2超伝導相のさらに先
に反強磁性相を発見して、中性子・放射光の結果と合わせて、
Nature Physicsの論文を書いたのですが、その時も、磁気
相図はミュオンで決めました。ミュオンは、測定の効率が
良く早いので、試料を下さった人に「もっとゆっくり測定
してよ!」と言われました(笑)。試料作成は高压合成で1
個作るのに何日もかかるのに、μSR 測定が半日で終わっ
てしまうから、当然ですね。物質の研究をやるからには、やはり新しい物質を見つけた

いですよね。今はいただいた試料を測って、それに対する
知見を返すことに終始していますが、逆にこちらからフィ
ードバックをかけて、ミュオンの測定を新規材料の予測に役
立てたいと思っています。

※ARTEMIS:
汎用μSR実験装置、Advanced Research Targeted Experimental Muon
Instrument at S-lineの頭文字。J-PARC ミュオン実験施設MUSEのSライン
とDラインに設置する双子の装置なので、ギリシャ神話の双子の神アルテ
ミスにネーミングルーツを持つ。
※Kalliope:
KEK Advanced Linear and Logic board Integrated Optical detector for
Positron and Electronの頭文字。こちらの名前の由来もギリシャ神話の文芸
の女神ムーサ(MUSE)の一柱カリオペ。(MUSEはJ-PARC ミュオン実験
施設の変称[Muon Science Establishment]でもある。)
※KEK: 高エネルギー加速器研究機構
※MPPC: Multi-Pixel-Photon-Counter、ピクセル型アバランシェ・フォト
ダイオード、高速・高感度のフォトダイオード。浜松ホトニクス社製。

J-PARC 物質・生命科学実験施設(MLF)のμSR 実験装置ARTEMIS※
(アルテミス)。その心臓部に当たるのがKalliope※(カリオベ)検出
器だ。この検出器を新しく開発するに至った経緯と、この先何を見たい
のかを、カリオベの開発に携わってきたKEK 物質構造科学研究所 准
教授の小嶋健児さんに話を伺った。



カリオベ検出器の1ユニット。左端の黒いブロック状の部分
が陽電子検出素子で、このブロック内に32チャンネル入っ
ている。指で指しているのが、信号歪みを劇的に改善した最
新型ASIC(カスタムIC)。この部分で信号を増幅して、デジ
タルヒット信号に変換する。コネクタの右側がデジタル信号
処理を担う基板で、ここからギガビットイーサネット光ファ
イバーで測定データがコンピュータに送られる。

表紙/採用はSR実験装置ARTEMIS (X-線) 編集部/J-SR実験装置ケルビスの開始 読者に携わった仲間たち。
奥列左から、平石、下田、森田、小嶋、ストロウラー、岡部、手取正広ら、土村内、李、栗田、
中央列の左の横並びはケルビスを制作する組員で、森田と小嶋の間に岡部と土村内が挟み込まれる。

