IMSS 物質構造科学研究所

物構研 広報誌 News

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構
物質構造科学研究所

2020.09 No.30

物構研 4つのプローブの歴史

物構研には、放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子という4つの量子ビームの実験施設と、それぞれの研究者･技術者がいます。このように複数の量子ビームを併せ持つ研究所は世界的にもほとんど例がありません。

物構研では、量子ビームを物質を知るための **探針**（プローブ）として用い、物質や生命について研究しています。4つのプローブがあるという強みを活かして、物構研ではひとつの研究対象に対して異なる種類の量子ビームを使う、他に例を見ないマルチプローブ研究を推進しています。

CIQuS

量子ビーム連携研究センターが始動

Center for Integrative Quantum beam Science: CIQuS …8ページ

KEK 一般公開 2020 は 9 月 6 日（日） 10:00 ～オンラインで開催予定

最新情報はウェブでご確認ください ⇒

物構研
4つのプローブの歴史
中性子・ミュオン編

物構研のロゴマークは、放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子の4つのプローブをモチーフにしたものです。

はじまりはブースター利用施設

1971年、筑波研究学園都市に高エネルギー物理学研究所（KEK）が創立、大きな陽子シンクロトロン（円形加速器）と段階的に陽子を加速するためのブースターシンクロトロンの建設が計画されました。ブースターの余りある陽子ビームを他の研究にも活用しようと、ブースター利用施設が設立されました。

陽子加速器で中性子ビームを

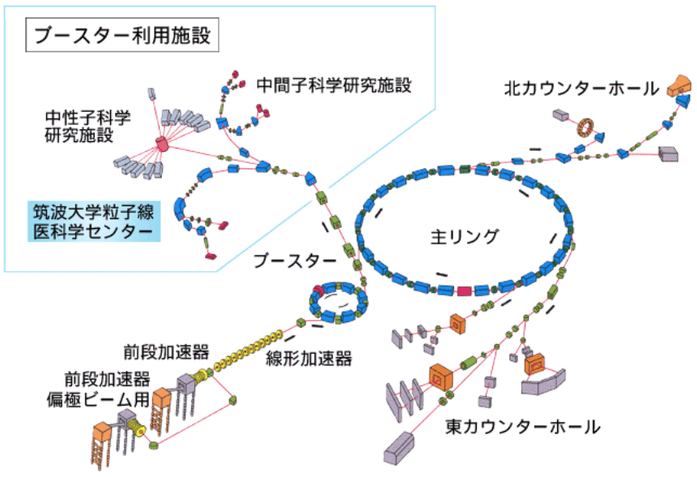
1960年代、電子加速器で中性子ビームを出す手法は世界各地で相次いで開発されました。日本では1967年に東北大学がパルス中性子源の開発に成功し、世界に先駆けて中性子回折実験による物質科学の研究を始めていました。

ビーム強度の不足に悩まされていた中性子の研究者たちは、ブースターから出る陽子ビームを利用すれば、より強い中性子ビームが得られると気づき、ブースター利用に名乗りを上げました。

パルス状ミュオンビームへの挑戦

一方、当時、研究のためのミュオン源はすべて陽子加速器による直流状ビームで、ミュオン発生施設は「中間子工場（メソンファクトリー）」と呼ばれていました。東京大学の研究グループがTRIUMF（カナダ）などの中間子工場でミュオンビームを用いた物性研究を経験していました。国内での独自のミュオン源の必要性を感じ始めた研究者たちは、ブースターの利用を検討します。

ブースターからはパルス状の陽子ビームが放出されますが、パルス状のミュオンビームの発生・利用は世界中の誰も試みたことがありませんでした。使い物にならないのではないか、という意見もありましたが、パルスだからこそできることがきっとあるはず、という信念のもと、ハイリスクなプロジェクトへの挑戦が始まったのです。



News@KEK 切らずにがんを治す（2）
～KEKと陽子線治療～より
https://www2.kek.jp/ja/newskek/2003/julaug/cancer2.html

3つのビームの分岐点（1979年ころ）
左から医学利用陽子・中性子・中間子

KENSの建設風景（1979年）

KENSの実験施設（1985年ころ）

3つのビーム

1977年ころブースター利用施設では、KEKが中性子ビームを、東京大学がミュオンビームを、筑波大学が医学利用のため陽子ビームを運用することが決まりました。建物・ビームライン・実験装置の整備が始まります。

そして1980（昭和55）年6月、陽子ビームを用いた世界最初の共同利用施設 中性子散乱実験施設KENS（Kou Enerugi-ken Neutron Source）で初めてのビームが観測され実験を開始しました。同年7月には東京大学附属中間子科学実験施設MSL(Meson Science Laboratory)でも実験が始まりました。1982年に筑波大学粒子線医科学センター（現在の筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター）が生物実験を開始し、翌年には陽子線によるがん治療の臨床研究が始まりました。

KENSには13本のビームラインが、MSLには4つの実験ポートが設置され、25年にわたって多くの研究者が実験を行いました。所属機関は違えど、KENSとMSLは物質科学に携わる研究者同士、意識し合いながら互いを高め合っていたそうです。研究に向かないと思われていたパルス状ミュオンについては、後に「日本が真に世界に先駆けて成功させた、真にオリジナルな研究である」と讃えられる結果となりました。

1997年4月に高エネルギー加速器研究機構（KEK）が発足し、同時に大学共同利用機関 物質構造科学研究所（物構研）が誕生しました。KENSとMSLはKEK物構研の所属となります。2004年にKEKが大学共同利用機関法人となり、MSLはその名称をミュオン科学研究施設へと変えました。

筑波大学は、KEKでの成果を活かして大学病院内に新施設を整備し2001年に移転しました。ブースター利用施設は2006年3月にその役目を終え、KENSとMSLは茨城県東海村のJ-PARC MLFに引き継がれることになります。 （7ページに続く）

参考文献：KEK 陽子加速器の軌跡―中性子・ミュオン―
KEK 2007

MSLの大型超伝導ソレノイド（1978年4月）

MSLの実験施設（1980年）

物構研
4つのプローブの歴史

放射光編

フォトンファクトリー

1970年代の初め、X線を利用する研究者の間で、日本に放射光の専用施設を建設すべきだという意見がまとまりました。海外のメソンファクトリーからヒントを得て、1972年には既にフォトンファクトリー(光の工場）の愛称で呼ばれていたそうです。1974年に日本学術会議が「放射光総合研究所」の設立を勧告し、構想は実現に向けて動き出しました。

フォトンファクトリー（PF）は日本初のX線領域の光まで発生する放射光施設として1978年度に着工、入射器として直線加速器（リニアック）と楕円形の光源棟および実験ホールが建設されました。当初、実験ホールは現在の半分の大きさしかなく半月型でしたが、その後まもなく増築工事が行われ、現在の形の建物になりました。1982（昭和57）年3月に初めて放射光取り出しに成功、放射光共同利用実験が開始されました。

放射光とは、超高速の電子が進路を変えるときに接線方向に放出する強力な光です。PFの光源リングには1988年から6年間、電子ではなくその反粒子である陽電子が回っていました。当時の環境では陽電子の方が減衰しにくかったためですが、真空技術の進歩に伴い再び電子が使われるようになりました。

半月のかたちで完成したフォトンファクトリー（1981年）

フォトンファクトリーでとられた
初めてのX線回折データ
（1982年3月18日）

フォトンファクトリーアドバンストリング

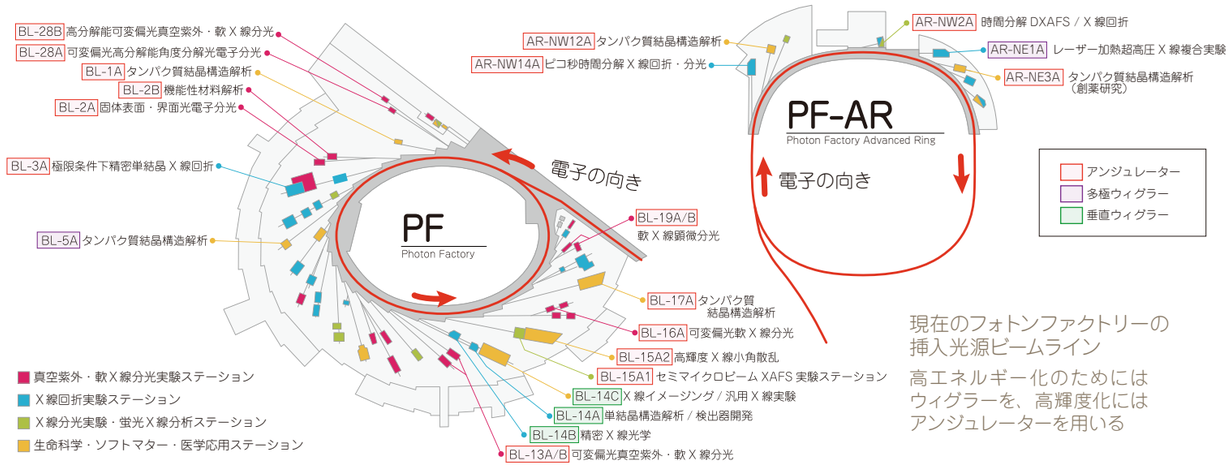
KEKでは1980年代の中ごろから高エネルギー物理学実験用の加速器「トリスタン」の建設が進められていました。トリスタンの前段加速器ARの電子エネルギーはPFリングよりも高く、よりエネルギーの高いX線が出せることから、その一部を利用するための実験ホールNE棟も併せて建設されました。1987年からビームラインの建設が開始され、1991年に放射光共同利用が開始されました。

1995年にトリスタン実験が終了した後、ARは大強度パルス放射光源として専用化され、フォトンファクトリーアドバンストリングPF-ARに生まれ変わりました。

NW棟を増築中の
PF-AR（2001年）

真空封止型アンジュレーターの誕生

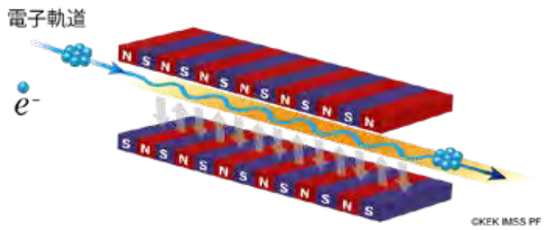
右ページ上の図の赤い太線は、リニアックから届き光源リングを回る電子の通り道を示しますが、電子が描く楕円形の接線方向にビームラインが出ているのが分かります。この楕円のかたちは、PFならではの進化をもたらしました。電子を曲げるための電磁石の間隔が長い直線部分には、より高性能の放射光を生み出すための装置



現在のフォトンファクトリーの
挿入光源ビームライン
高エネルギー化のためには
ウィグラーを、高輝度化には
アンジュレーターを用いる

（挿入光源）を組み込むことができます。PFでは早期から挿入光源の開発が行われたことで、後続の放射光施設と同様の性能を出せる施設であり続けたのです。

挿入光源の代表格、アンジュレーターの模式図を以下に示します。周期的な磁場の中を通過すると電子はローレンツ力により蛇行します。アンジュレーターは、その蛇行によって出た放射光が干渉によって強め合うこと



を利用しています。

それまでは電子の通る真空パイプの外から磁場をかけるアンジュレーターが一般的でしたが、電子軌道上に高い磁場をかけることは困難でした。よりエネルギーの高いX線を出すためには、電子のエネルギーを高くするか、電子をより短い周期で蛇行させる必要があります。電子のエネルギーを高くするには巨大な施設が必要になるので、PFでは後者を選びました。1988年ころアンジュレーターの磁石列ごと真空パイプの中に入れてしまうことで短い周期を実現する「真空封止型アンジュレーター」の開発が始まりました。1990年に世界最初の真空封止型アンジュレーターが完成し、初号機はPF-ARに設置されました。また、後に建設された大型放射光施設SPring-8でも広く採用されました。さらにこの技術はその後の放射光施設の設計をコンパクトで省エネなものに変え、建設や運用の敷居を下げたことで、世界中で放射光施設が建設される時代の訪れに寄与しました。

PF AR-NE3Aに設置された世界初の真空封止型
アンジュレーターの内部のようす
磁石列の隙間はわずか1 cmまで狭めることができる

ユーザーとともに歩むフォトンファクトリー

2009年のノーベル化学賞は、巨大なタンパク質・RNA複合体であるリボソームの構造機能解析を行った3氏に贈られましたが、その一人にイスラエルのアダ・ヨナット（Ada Yonath）KEK特別栄誉教授がいます。PFでは1985年から構造生物学研究に取り組んでいますが、彼女はそのごく初期のユーザーです。リボソームの構造解析に必要な精製、結晶化に長年取り組み、1987年から10年近くの間、何度もPFを訪れ研究を続けました。自らタンパク質結晶の放射線損傷を制御するための技術開発を行うとともに、PFで独自に開発されたX線回折写真法の性能を海外のユーザーに伝えたと言われています。

PFではいまも、大型施設の利用機会を提供するだけでなく、ユーザーのニーズに沿った手法や装置開発を伴う研究を大切にしています。開発された技術は国内外の放射光施設で多くの研究成果創出に貢献しています。

物構研
4つのプローブの歴史
低速陽電子編

電子加速器で高強度低速陽電子ビームを

陽電子（e^+）は電子の反粒子で、両者が出会うと消えてしまいます（対消滅）。ところがその逆もあって、高エネルギーの電子をコンバーター（重金属）に当てると、内部で電子と陽電子が対生成します。

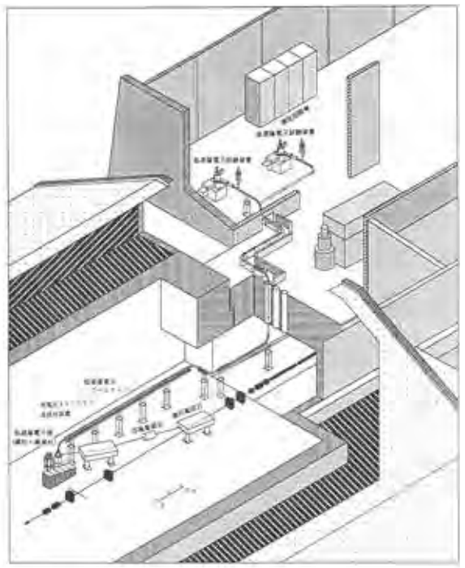
KEKでは1980年代後半に電子リニアック（線形加速器）の電子ビームから強力な陽電子ビームを作る技術を確立し、トリスタンの蓄積リングARやPF放射光リングに入射していました。

生成したばかりの陽電子はエネルギーにばらつきがありますが、モデレーターでエネルギーを揃えた陽電子は「低速陽電子」と呼ばれ、物性研究に有用なプローブであることは以前から知られていました。従来の低速陽電子は^{22}Naなどの人工的な放射性同位体がβ崩壊*するときに出る陽電子から作るもので、強度が不十分でした。PF入射器研究系（現在の加速器研究施設 第5研究系）では1992年から電子・陽電子入射器棟のリニアック北端に、新たなコンバーターによる低速陽電子源とビームラインの建設を進め、1994（平成6）年に完成して共同利用が始まりました。

実験施設はその後移転して、現在は同じ電子・陽電子入射器棟の南端に、専用の電子リニアックとビームラインを持つ低速陽電子実験施設（SPF）があります。

*β崩壊：原子核に対して1つの電子または陽電子が出入りし、原子番号が1だけ増減するような放射性崩壊

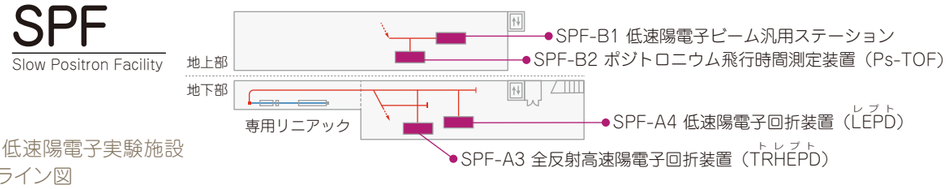
ポジトロニウム飛行時間実験装置
Photon Factory News Vol. 15 No. 1, 1997 表紙より



低速陽電子源のイラスト
PF 低速陽電子源建設報告(I)
KEK Report 93-13 1993 より

究極の原子配列解析装置

2010年、モデレーターの改造で低速陽電子ビームが10倍に増強したことにより、物構研の低速陽電子研究が飛躍的に進歩します。KEKでは、加速器と陽電子、そして表面科学の研究者が協調して研究を進めることができるため、世界に先んじた装置開発が可能でした。特に、全反射高速陽電子回折法TRHEPD（トレプト）は世界初の究極の表面構造解析手法と呼ばれています。この手法により、固体触媒表面やグラフェンなど単原子分子層状化合物最表面の原子配列が解明されています。



現在の低速陽電子実験施設
ビームライン図

物構研
4つのプローブの歴史
中性子・ミュオン続編

中性子初ビーム記念（MLFコントロールルームにて）

ミュオン初ビーム記念（MLF 第1実験ホールにて）

中性子・ミュオンの実験施設が東海村に

1990年代、日本で培われた技術が欧米で開花、より大強度のパルス中性子・ミュオン源が稼働を始め、国内でも1 MW級の大強度陽子加速器への夢が高まりました。KEKでは中性子・ミュオンだけでなく原子核素粒子研究や短寿命核研究分野に及ぶ学際的プロジェクトの計画が立てられました。同じころ、旧日本原子力研究所（現 原子力研究開発機構 JAEA 原子力科学研究所）でもパルス中性子将来計画が提唱されました。当時の省庁再編の動きとも相まって、「統合計画」としてKEKとJAEAが共同で茨城県東海村に大強度陽子加速器施設（J-PARC）を建設・運営することになりました。

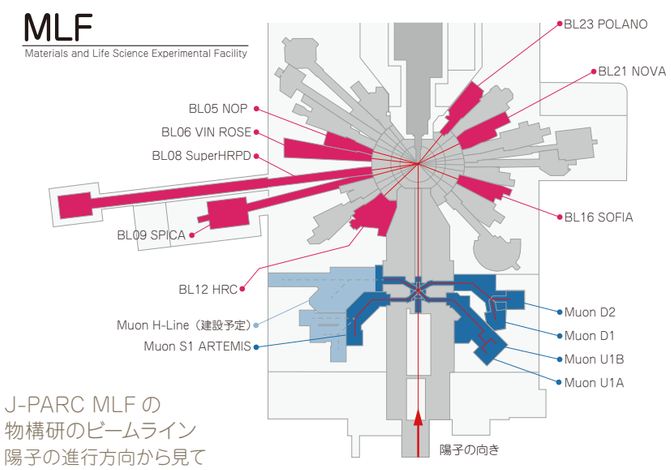
そして2008（平成20）年12月、J-PARC物質・生命科学実験施設（MLF）が共用・大学共同利用等を開始しました。MLFでは、中性子とミュオンの生成ターゲットは同じ陽子のビームライン上にあります。上流にミュオン生成のターゲットがあり、そこから伸びる4本のミュオンビームラインと実験エリアはすべて物構研が管理しています。

ミュオンターゲットを透過した陽子ビームは中性子源に送られ、そこで発生した中性子は23のビームラインに輸送されます。中性子ビームラインはKEK・JAEA・総合科学研究機構（CROSS）・茨城県により管理されており、物構研は8つのビームラインを担当しています。

未来の技術に貢献するMLF

MLFでは世界最強クラスの輝度の短パルス中性子・ミュオンビームが利用できます。加えて、研究者・技術者が所属の垣根を超え、互いに切磋琢磨することで、高感度・高速・高分解能測定や、複雑な試料環境での実験を可能にしています。これにより、物理・化学・生物学・材料科学から産業応用まで様々な分野における最先端の実験が行われています。

J-PARC MLF のミュオンターゲット部
陽子は左から右へ向かう



J-PARC MLF の
物構研のビームライン
陽子の進行方向から見て
左手が第1実験ホール、右手が第2実験ホール

4つのプローブを活かしたマルチプローブ研究へ

量子ビーム連携研究センターが始動

Center for Integrative Quantum beam Science: CIQuS

物構研では構造物性研究センター（CMRC）を発展的に改組し、2020年4月、量子ビーム連携研究センター（CIQuS（サイキュース））を新設しました。CIQuSは、それぞれに進化してきた放射光・中性子・ミュオン・低速陽電子という4つのプローブを活かして、新たな「発掘型共同利用」と「テーマ設定型共同研究」を推進します。また、若手人材を育成することで、これまでにない新しいマルチプローブ連携分野を創成することを目指しています。着目するのは、物質の表面構造・内部構造・不均一構造という3つの観点です。

現在以下の4つのカテゴリーにおいて11件のテーマ設定型共同研究が進められています。

・マルチプローブ利用研究の基盤形成
・新たなデバイス開発へ向けた物性研究
・材料の機能発現サイトの可視化
・自然物の生成過程の履歴解明

CIQuSは、マルチプローブ利用と様々な組織の研究者間の連携を通じ魅力的なサイエンスを生み出していきます。

CIQuSの研究リーダー

KEK一般公開2020 今年はオンライン開催

KEK一般公開

9月6日（日）10時からライブ配信

フォトンファクトリーからの生中継や、ミュオン科学研究系の研究紹介トーク、質問コーナーもあります。各研究施設の紹介動画も公開中。https://www2.kek.jp/openhouse/2020/

KEK一般公開
物構研特設サイト

https://www2.kek.jp/imss/news/2020/topics/openhouse/

物構研ネコTも買えます！

例年、KEK一般公開の会場で販売していた物構研ネコTシャツですが、なんとオンラインでの販売が始まりました。
グッズ制作会社の通信販売サイトでお求めいただけます。

株式会社ビー・シー・シー
「宇宙の店」：
https://spacegoods.net/

元素ならべネコTシャツ　歩く犬エコバッグ

J-PARC施設公開や
大学共同利用機関シンポジウムも
オンライン開催を予定しています

IMSS 物質構造科学研究所
KEK

編集：物構研 広報室（瀬戸 秀紀、足立 伸一、安達 成彦、阿部 仁、市村 規子、岩野 薫、宇佐美 徳子、大島 寛子、神田 聡太郎、瀬谷 智洋、中村 惇平、深堀 協子、山田 悟史）

発行：高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1 TEL: 029-864-5602
https://www2.kek.jp/imss/　e-mail: imss-pr@ml.post.kek.jp（物構研 広報室）
禁無断転載 ©All rights reserved by High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

IMSS Facebook
モバイルサイト

Anniversary Since 1971 50th Year Accelerating

2021年、KEKは創立50周年を迎えます