

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構大学共同利用機関

物質構造科学研究所



2021.03 No. 32









低速陽電子実験施設の ターゲット部更新

1F

SPF-B2
ポジトロニウム飛行時間測定
(PS-TOF) ステーション

B1F

ターゲット部
(低速陽電子生成ユニット)
パルスストレッチセクション

SPF-A3
全反射高速陽電子回折
(TRHEPD)ステーション

W Positron Facility

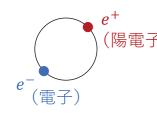
SPF-A4

物構研の4種の量子ビームの一つ低速陽電子の実験施設 Slow Positron Facility
 略称 SPF は、KEK つくばキャンパスの南西角、線形加速器の入射器棟にある。
 2020年夏に10年ぶりのターゲット部(低速陽電子生成ユニット)更新作業が行われた。結果、世界最強クラスの低速陽電子ビームを提供し続けている SPF のビーム強度は最大で10⁸個/秒の大台に乗った。
 SPF スタッフと多くの協力者によるターゲット部更新作業と、SPF ユーザーの声をご紹介する。

C S D E

「世界が変わったようだった」

「いままでよりも速くきれいなデータがとれるようになりました」と笑顔で語るのは、東京大学大学院工学系研究科の周健治助教だ。周氏は、2017年から SPF で実験を行うユーザーで、原子・光科学の研究者である。周氏が実験を行うのは SPF-B1汎用低速陽電子実験ステーション。陽電子と電子からなる「原子」ポジトロニウム (Ps) を、独自に開発



・ した特殊なレーザーで低 (陽電子) 温まで冷やすことで反粒子を含む物質の性質を詳しく調べ、宇宙創世の謎を解明することに挑戦している

ポジトロニウム(Ps)の模式図 という。レーザー冷却は光

を使って物質の運動量を効率よく奪う技術だが、Ps は $0.14 \mu s^*$ の寿命で消滅してしまうため、その間の レーザー冷却に成功した例はこれまでなかった。

今回のターゲット部更新前はこの実験にとって ビーム強度(低速陽電子の数)が十分ではなかった。 更新とビーム輸送の最適化により、ビーム強度は大幅に増加した。その結果、周氏が参加する研究グループは世界で初めてとなる Ps のレーザー冷却成功を強く示唆するデータを取得することができた。 周氏は「世界が違うくらいビームが強くなった」と振り返る。目標の $10~{\rm K}\,(-263\,^{\circ}{\rm C})$ まで冷やすにはまだ多くの技術開発が必要だが、手応えは十分だ。

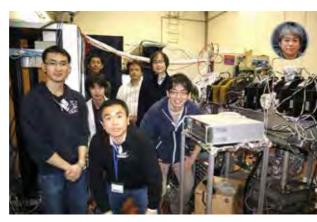
この実験に使う低速陽電子ビームは1秒に50回、数 ns* 間だけ届くパルスだ。レーザーは1秒に10回だけそれに合わせて照射できるが、まだ安定した照射が難しい。今は1つのパルスで多くの低速陽電子が来ることで測定時間が短くなり、レーザーのふ

らつきの影響のない格段に質の高いデータがとれるようになった。「今までは観測できなかった温度変化などを時々刻々と見ていけるようになりました。反粒子を含む物質と光との間のダイナミクスを解析しながら、確度の高い冷却のデータを蓄積していきたい。」ビーム増強により、さらに高度な実験を考えられるようになった。

試行錯誤の多い実験なので、ユーザーの立場としてはビームタイムの割り当てが増えればもっと嬉しい。「考えただけでも難しそうだけど」と断りつつも、パルスを振り分け 2 ユーザーグループが同時に実験できるようにできないか、とアイデアを語る。

終始穏やかに話していた周氏はこう締めくくった。 「ただ、基本的にはとても満足している。ここに SPF があってよかったな、なかったらどうしようもな かったというのが正直なところです。|

世界初の実験は、施設心臓部の更新をきっかけに大きく動き始めた。今後が楽しみだ。



Ps レーザー冷却の研究メンバー(写真:周健治氏ご提供)低速陽電子実験施設 SPF-B1 にて 2020年12月撮影 後列左から 産業技術総合研究所 大島 永康 研究グループ長、東京大学 吉岡 孝高 准教授、中列左から 小林 拓豊氏、周健治 助教、前列左から 魚住 亮介氏、石田 明 助教、田島 陽平氏、右上円内は 難波 俊雄 助教



貴重な貴重な低速陽電子

ターゲット部更新について話を始める前に、低 速陽電子ビームの作り方を説明したい。

まず線形加速器で電子を加速し、重金属に打ち込むことで電子と陽電子の対を発生させる。得られた陽電子は、非常に高エネルギー(高速)で、しかも速度にばらつきがあるので、実験に使うためにはさらに処理が必要だ。減速材(モデレーター)と呼ばれる金属薄膜に当て、その中でエネルギーを失わせてから表面に出てくる低速陽電子を取り出し、加速して、磁場を使って真空中を輸送する。低速陽電子とは単に「低速な陽電子」という意味ではなく、「上記の方法で得られる、エネルギーが揃い、しかもエネルギー可変な陽電子」を指す用語なのである。

では、減速材からなぜ陽電子が出てくるのか、 なぜエネルギーが揃うのか。

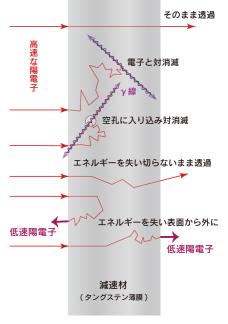
金属に一定以上のエネルギーを持つ光を当てると電子が様々な速度で飛び出す現象を光電効果という。飛び出す電子の速度の最大値を v_{\max} とすると、以下の式が成り立つ。

$\frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 = h v - W_{\text{e}}$

ここでmは電子の質量、hv*は光子1つがもつエネルギー、Weは金属によってきまる<u>仕事関数</u>*で、光が与えたエネルギーhvが仕事関数Weより大きければ、電子は金属表面から飛び出すことができる。一般にこの仕事関数は電子(electron)に対するものなので、Weとした。通常Weは正の値を持つ。

さて陽電子 (positron) に対しても仕事関数を定義することができるので、それを W_p としよう。一部の金属では陽電子仕事関数 W_p が負の値を持つ。そのような金属では、内部でエネルギーを失った陽電子が、光などのエネルギーを与えられなくても、ふらふらと表面に戻って来さえすれば、仕事関数分の揃ったエネルギーをもらい外に出る。

$\frac{1}{2} m v^2 = -W_{\rm p}$

ただし、m は陽電子の質量、v は速度である。 陽電子仕事関数 W_p が負の金属は、タングステン W (-3 eV)、ニッケル Ni (-1 eV)、銅 Cu (-0.3 eV)、 などが知られている。そのような、表面から陽電子 を出す性質を持つ金属が低速陽電子の減速材とし 

減速材薄膜に左から高速な 陽電子を当てた場合の模式図

れば、さまざまな実験に必要なエネルギーをもつ低 速陽電子ビームとなる。

と言っても、残念ながら減速材に当てた陽電子がすべて低速陽電子になって出てくるわけではない。打ち込まれた陽電子の大部分は金属薄膜を透過し、透過しなかった陽電子も多くはエネルギーを失ったあと、熱振動する原子にぶつかりながらさまよい、いずれは電子と対消滅してしまう。金属内の原子空孔*に入り込んだら表面に戻って来られない。原子配列の乱れがあっても動きが鈍る。

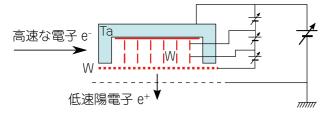
そこで SPF では、低速陽電子をなるべく多く 取り出すため減速材の形状や熱処理などに工夫を 重ねてきた。

前回の SPF ターゲット部更新は 2010 年、兵頭 俊夫氏と和田 健氏を中心に行われた。それまでは平行に並べられていた減速材薄膜を、井桁状に組み 2 段にするなど形状の工夫をした。その他の調整も加えた結果、従来の 10 倍を超えるビーム増強となったのだった。



タンタル中で陽電子が発生する。高速な電子が手前から打ち込まれ、それ以外はタンタルでできている。井桁状の部分はタングステン薄膜、ターゲット部の基本構造

* µsは10⁻⁶ 秒、nsは10⁻⁹ 秒



新ターゲット部の模式図↑ 高速な電子が重金属タンタル Ta に打 ち込まれ陽電子が発生、タングステン W表面に出てきた低速陽電子を磁場 で引き出し、電圧により加速する





今回のターゲット部更新は、放射線等によって 劣化した部品の補修に伴うもので、部分補修が難 しかったため全交換となった。せっかく交換する ならメンテナンスがしやすく、より高性能なも のにしようと計画が立てられた。更新は2020年 夏の加速器運転休止期間中に行うことになった。 10年前の更新のメンバーに望月 出海氏が加わっ た3名体制で臨む。和田氏は、春に他研究所から 物構研に戻ってきたばかりだったが、10年前の 記憶と記録を掘り起こしながらの作業となった。

ここで敢えて研究者たちの年齢に言及すると、 兵頭氏は70代、和田氏は40代、望月氏は30代。 兵頭氏と和田氏は陽電子科学の研究者、望月氏は 表面科学の研究者だ。3人は低速陽電子を使って 研究を行いながら、実験施設の運営も担う。今回 のターゲット更新も3人で段取りを考え、役割 分担をして計画的に進めてきた。

ターゲット部は陽電子生成の過程で放射化す る。放射化とは、エネルギーの高い放射線によっ て、もともと放射能を持たない物体が放射性物質 になることだ。普段は遮蔽体で厳重に覆われてい て周囲の放射線強度は十分低いが、更新作業のた めには覆いを外さなければならない。作業者の被 曝をできる限り減らすため、春の運転期間終了後 からできるだけ日数を開け、かつ秋の共同利用実 験開始に間に合うスケジュールが組まれた。



ターゲット部の設計は既に終わっていて、10年 前の実績がある業者に厚さ25 µmのタングステン 薄膜の加工を任せてあった。レーザーカットされた



タングステン薄膜で井桁を組んでいるところ メガネ型ルーペを借りた和田氏が一言「今回の大きな誤算 は(前回の更新から10年経って) 老眼が始まったこと…」

短冊状のタングステンパーツはとてもきれいに仕上 がっていた。

しかしこのとき3人には懸念があった。今回納品 されたタングステンパーツはターゲット部1組分し かなかったのだ。予備がないということは非常に大 きなプレッシャーとなる。この後の作業工程でパー ツ1つでも駄目にしてしまえばターゲット部は完成 せず、秋の共同利用実験を予定通り開始できなく なるからだ。今から予備を製作するすべはないか。 3人はKEK共通基盤研究施設機械工学センター に相談した。高富 俊和 技術副主幹は「ぜひ協力し ましょう」と引き受けてくれたという。3人は胸を撫 で下ろした。

KEK での加工法はレーザーカットではなく水の中 で行う放電ワイヤーカットになる。保住 弥紹 技師 は、工夫しながら多量のタングステン薄膜の複雑な ワイヤーカットをこなしてくれた。ただ、加工後の薄 膜表面は酸化により一部変色してしまっていてこれ が低速陽電子放出に与える影響は未知であり、でき る限りこれを除去すべきだろうということになった。 今度は同センターの井上 均 研究支援員が化学研磨 によるタングステン洗浄を担当してくれた。これで、 井桁は予備も含めて5セットが準備できた。



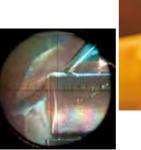
防護服とゴーグルを身につけドラフトの中で行われた タングステン薄膜の化学研磨作業のようす 研磨液が入った容器に井桁を浸けるところ。この後、 研磨液は付着物によって黄色に変色した。

チングステンパーツのアニール作業

さらに一手間かけて、より多くの低速陽電子を 取り出せるターゲット部を作るために欠かせない 作業がアニール(焼き鈍し)だ。金属の融点より も低い温度でじっくり熱しゆっくり冷ますこと で、金属の中にある原子空孔や配列の乱れを減ら す。陽電子が表面に戻ってくる確率を高めること が目的である。

タングステンの融点は3000℃を超える。それ ほどの高温で熱することができる装置と言えば、 機械工学センターの大型電子ビーム溶接機だ。高 出力の電子ビームをアニールに使うことは本来の 使用法ではないが、機械工学センターは10年前 同様に利用を受け入れてくれた。のぞき窓の材質 と汚れのために放射温度計を用いても炉内の正確 な温度が測定できないので、まず同じ素材を熱し て融ける条件を見つけ、アニールに適切な出力と 加熱時間の条件を割り出す。

井桁をまんべんなく熱するために、タングステン 薄膜で作った四角い「お弁当箱」に入れ、溶接機





井桁は「お弁当箱」に納められ炉内に



1982 年製の電子ビーム溶接機でアニール作業 左手前から保住氏、兵頭氏、和田氏、右は望月氏 兵頭氏と和田氏の間にある黒い筒状の覗きメガネを 通して、左上の写真のように炉内を確認できる

のビームを箱全体に広げた上で、場所による温度差 が出ないよう蓋にビームを当てスキャンした。アニー ルは、保住技師のサポートを受け、加熱の観察と 指示・レバー操作・タイムキーパー・記録と4人が かりの作業となった。オペレーターと、使い込まれ た電子ビーム溶接機が健在ということも、ターゲッ ト部更新にとって実は重要なポイントだ。



チョーゲット部組み立て



タングステン薄膜の井桁とタンタルの パーツでターゲット部を組み上げていく

アニール作業が終わると、3人は低速陽電子実 験施設内のクリーンブースに戻り、ターゲット組み 立て作業に取りかかった。パーツを作製した業者も 立ち合い、緊張感漂う作業が続く。

組み立てが終わると、低速陽電子を引き出すため の電圧が適切にかかるか、導通/絶縁テストを行う。 ところが、テスターは思ったような結果を示さなかっ た。複雑な組み立てをやり直し、テストを繰り返す。 狭いクリーンブースは重

たい空気に包まれたが、 集中力が切れることは



まれた

物構研 News No.32

チョウット部交換の日

秋の運転開始を1ヶ月後に控えた9月14日、い よいよターゲット部を交換する作業が行われた。現 場には、低速陽電子実験施設のスタッフのほか、 加速器研究施設などから関係者が集まった。

KEK では放射線の安全管理は共通基盤研究施 設 放射線科学センターによって行われている。 SPF の担当は岩瀬 広 助教で、その計測値によっ て作業の制約条件が判断される。作業期間中にこ の現場に立ち入る際はリアルタイムで表示される 個人線量計を身につけなければならない。

準備のあと、最も放射線量の高い旧ターゲット部 の取り外し作業が始まった。一段低い作業場所に いられる時間は1人20分と制限された。作業手順 を確認し、全員が見守る中1人ずつ作業場所に降 りて、慎重にボルトを外していく。



取り外された旧ターゲット部は、施設内の、人が 立ち入らない場所に作られた鉛の棺に納められた。 線量が下がった後で処分される予定だ。旧ターゲッ ト部を外せば線量が大幅に下がるという期待は裏 切られ、作業可能時間は多少延びたものの、時間 に追われながらの作業が続く。

お昼前、慎重に準備してきた新しいターゲット部 が持ち込まれ、和田氏と望月氏が取付作業に入っ た。しかし、不具合が見つかった。ねじを外してクリー ンブースに持ち戻ることになり、現場には焦りや不 安な気持ちが漂う。そのとき、加速器第五研究系 の峠 暢一 教授が「昼の休憩にしよう」と声をかけ た。緊張が続くスタッフを休ませたのだ。

午後、気を取り直して再度の取り付けを行う。取 り付け後の導通テストでやっとOKが出た瞬間、安 堵の声が聞こえた。



その後、高圧電源ケーブル交換や冷却水ホース 接続などの関連工事が行なわれた。普段は真空の ビームラインが大気圧に解放されたこの機会を利 用して、真空計も取り付けられた。これはフォトン ファクトリー 基盤技術部門 インターロックチームが SPF への導入を進めている真空インターロックシス テムの真空計で、ターゲット部周辺の真空度低下 を検出すると自動でバルブが閉じられる仕組みだ。

多数の関係者の協力を得て、SPF の心臓部はリ フレッシュされた。機械工学センターが作製した予 備の部品が使われることはなかったが、3人の精 神的な支えとなったことは言うまでもない。





ピロスストレッチャー改良計画

今後も低速陽電子実験施設の整備計画は続く。 SPF では運転モードが2つあり、冒頭に紹介し たレーザー冷却の実験ではショートパルスモードを 使うが、表面科学の実験などではロングパルスモー ドを使う。後者では、前者よりもビームが強くなる。

たとえ瞬間的であってもビーム強度が実験装置 の検出器の受容限界を超えると、データが強度に 比例しなくなり正しい測定ができない。これを解決 するため SPF には低速陽電子を一時的に貯め込 みビーム強度を望す「パルスストレッチャー」が設 置されている。



現在の SPF パルスストレッチャー部 左手奥のコンクリート遮蔽体の中にターゲット部があり、 低速陽電子は奥から手前に輸送されてくる

現在のパルスストレッチャーは、エネルギー5 keV までしか対応していない。ロングパルスモード で 15 keV のビームを必要とする全反射高速陽電子 回折 TRHÉPD では、今回のターゲット部更新によ るビーム増強で検出器の受容限界を超えた。その ため、残念ながらフル稼働はできておらず、パル スストレッチャー改良は最優先課題だ。

SPF TRHEPD のヘビーユーザーのひとり、早 稲田大学 理工学術院 先進理工学部の高山 あかり 准教授は、表面物理学の研究者だ。2016年から SPF に通い、グラフェンなどの表面の構造解析を 行っている。2019 年に SPF の望月氏、兵頭氏との 共同研究成果がプレスリリースされ話題になった。

研究室の学生にも SPF の利用を勧めている高山 氏に、SPFの評価を尋ねた。「表面系の構造解析 ができる限られた手法の中でも陽電子回折法は強 力な手法です。試料の性質上、実験施設内で試料 を作製する必要があり、SPF にはその設備がある ことも魅力です。|

現状では1つのパルスが強すぎて強度を抑えな いと正しく測定できないが、将来パルスストレッ チャーが改良されたら、現状の10倍以上の効率で 実験が可能になるのではないか。そうなれば、今 は固定している方位角を変化させる測定も、持ち時 間内にできるようになる。測定装置を改良して、試 料表面の時間変化も測れるようになったらおもしろ そう、と夢が膨らむ。

また高山氏からも、ビームが強くなったら分け合っ てでもより長いビームタイムが欲しいという希望が 聞かれた。低速陽電子ビームの需要の高さを改め て感じさせられた。

2019/11/14 東京大学大学院理学系研究科: 早稲田大学·日本原子力研究開発機構·KEK 共同プレスリリース

グラフェン超伝導材料の原子配 列解明に成功 ~薄くて柔らかい、 原子スケールの2次元超伝導材料 の開発に新たな道~



https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191114.pdf

このまま運転が続けばまた10年後あたりに同様 のターゲット部更新が必要になるだろう。心臓部で はあるが、不具合がない限り通常の運転では触らな い場所だけに、工程の記録とノウハウの継承は重要

物構研の低速陽電子実験施設は、何でも自分た ちでこなさなければならない少人数の体制だが、知 見や経験の継承は着実に行われている。



SPF テストホールにて 2021 年 2 月撮影 左から 永井 康介 教授、和田 健 准教授、望月 出海 助教、 兵頭 俊夫 ダイヤモンドフェロー

(文・写真: 深堀 協子、写真: 和田 健、ロゴ・マップ: 大島 寛子)



小菅氏と鍵管理ロボット 細い板に掛けられた 鍵をロボットが選んで貸し出していた PF-AR 北西実験棟管理室にて 2021 年 2 月撮影

お疲れさま! PF-AR の鍵ロボット

フォトンファクトリー (PF) のビームラインでは、かつて、立ち入りや装置の操作などに多くの鍵が必要とされていました。人と装置の安全確保のため、その鍵が使われているときはこの鍵は貸し出さないなどのルールがあり、要請に応じて人が判断し鍵を開けに行くことも少なくありませんでした。PFとフォトンファクトリー アドバンストリング (PF-AR) は少し離れた場所にあります。足を運ばなくても適切な人に適切な鍵を渡すことができないかと、2002 年小菅 隆 先任技師が中心となり PF-AR の鍵管理ロボットが開発されました。メッセージ配信システム STARS* を活用した鍵ロボットは、既成の鍵管理システムにはない管理能力を持ち、かつ低コストでした。

ロボットは北西棟玄関横でひたすら鍵貸し出しに務めてきましたが、残念ながら老朽化には勝てず動かなくなりました。この間に、PF・PF-ARのビームラインでは鍵がほとんど要らない新しい制御システムが稼働しており、ロボットは引退することが決まりました。

今後は、最低限必要な鍵を新しいシステムで管理する ことになり、準備が進められています。

*STARS (Simple Transmission and Retrieval System): 小菅氏らによって開発されたビームラインの制御システム。 他機関の実験施設などでも活用されている。

MUSE で学生実験を応援

KEK では加速器科学への興味を持ってもらうことを 目的に大学3年生以上を対象とした「加速器科学イン ターンシップ」を実施しています。

J-PARC MLF のミュオン科学研究施設 (MUSE) では、2018 年からこの制度を活用して学生を受け入れています。

今年は名古屋大学の高エネルギー素粒子物理学研究室の学部 4 年生 4 名がミュオンビームライン D1 を訪れ、自ら考案し自作した検出器で実験を行いました。ミュオンの崩壊で生じる陽電子の位相空間分布を表すパラメータを測定し、解析結果はそれぞれの卒業論文にまとめられました。



実験を行った学生と 支援した名古屋大学および物構研のスタッフ J-PARC MLF MUSE D1 にて 2021 年 1 月撮影 (写真:名古屋大学 鷲見 一路氏 ご提供)



2021 年 4 月 1 日、 KEK は創立 50 周年を迎えます。 物構研もこの日で 創立 24 周年です。

KEK50周年特設サイト:

https://www2.kek.jp/kek50/index.html



予定されている主な記念行事

KEK50周年 オープニングセレモニー (ライブ配信予定)

科学技術週間の4月16日(金)午後

KEK50周年 記念式典・祝賀会

11月8日(月)(東京)

KEK50周年 記念シンポジウム

11月9日(火)~10日(水)(つくば)



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