

## 大強度低速陽電子ビームによる表面・界面科学の新展開

### ① 計画の概要

電子の反粒子である陽電子を用いた研究の高度化を推進する。陽電子と電子の対消滅によって放出される $\gamma$ 線を検出することによる陽電子消滅法が、従来から確立している。これに、陽電子回折や固体最表面のスピンの偏極率の測定等の新たな手法を加えた研究を展開する。

陽電子は単色エネルギー可変ビームとして利用することが多いが、従来の放射性同位元素や加速器を利用する方法で得られるビーム強度には限界があり、この分野の展開を妨げていた。本研究では大きなパワーを有する加速器を用いて生成した大強度低速陽電子ビームを利用することによって、この分野に大きなブレイクスルーをもたらすことを目的とする。具体的には、電子リニアック及び小型サイクロトロンを用いて大強度低速陽電子ビームを生成し、物性物理学

及び原子分子物理学の研究の共同利用によって、この分野のさらなる発展を推進する。特に、(1) 様々な物質最表面の原子配列を正確に高速に解明、(2) スピン研究の高度化、(3) 格子欠陥3次元分布測定の高度化、(4) 高分子アモルファス構造の決定、(5) レプトン束縛系の研究の高度化、等を目指す。これによって世界トップレベル研究拠点の形成と知の基盤の強化、あるいは素材・ナノテクノロジー分野における新たな価値創出のコアとなる技術の強化を図る(図1)。

本課題を実施するのは、日本陽電子科学会である。実現すれば諸外国からのユーザーが研究のために訪れ、世界の中心的機関としての役割を果たすことになる。

### ② 学術的な意義

電子の反粒子である陽電子は、金属のフェルミ面や結晶中のバンド構造、結晶中の空孔型欠陥、ナノ析出、高分子中の自由体積の測定などに利用され、様々な情報を提供してきた。近年、陽電子回折による結晶表面の構造解析や表面スピンの研究、金属や半導体中の格子欠陥3次元分布の測定など、新たな研究が展開している。また、レプトン束縛系(ポジトロニウム、ポジトロニウム負イオンなど)の研究の新展開も行われ、物質科学への応用研究も行われている。

本課題が実現すれば、これらの研究を大きく発展させた下記のような展開が可能となる。

- (1) 様々な物質最表面の原子配列を正確に高速に解明：微小結晶しか作ることができない材料の研究やポンププローブなどを利用した時間分解測定によって、表面ダイナミクス研究が可能になる。まさに回折実験の新時代の幕開けと言える展開が期待できる。
- (2) スピンの研究の高度化：エネルギーバンドごとのスピン構造の観測や局所的なスピン偏極効果の観測、スピン流の可視化が可能となり、スピントロニクスやトポロジカル物質の研究に貢献する。
- (3) 格子欠陥3次元分布測定の高高度化：格子欠陥分布の測定の高効率化や格子欠陥ダイナミクスの研究が可能になる。
- (4) 高分子アモルファス構造の決定：高分子のアモルファス構造の高感度ナノプローブとしての利用が可能になる。
- (5) レプトン束縛系の研究の高度化：高強度高輝度エネルギー可変ポジトロニウムビームの生成が可能となり、ポジトロニウムを用いた表面研究、例えば逆ポジトロニウム分光が可能になる。またポジトロニウムのボーズアインシュタイン凝縮や電子・陽電子ペアプラズマが実現する。

以上の展開によって、表面・界面科学の研究が大きく発展し物質科学の分野に大きく貢献するとともに、レプトン束縛系の基礎研究が新たな新展開を迎える。

### ③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

高強度低速陽電子ビームを得るためには、核反応からの $\gamma$ 線やリニアックで加速した電子の制動放射 X 線からの電子陽電子対生成が用いられる。現在世界最大の強度は、ミュンヘン工科大の原子炉で得られる中性子の核反応を利用した  $1.1 \times 10^9/s$  であり、わが国では、KEK でリニアックを利用した  $5 \times 10^7/s$  という世界第2位のビームが実用化されている。産総研(リニアック利用)や京大複合研(核反応からの $\gamma$ 線を利用)でも、低速陽電子ビームが用いられている。その他、米国、ドイツ、オランダ、フランスに原子炉やリニアックを利用した高強度ビームが完成している。しかし今後の展開のためには、いずれの施設もビーム強度が不足しているのが現状である。

本計画では、原子炉ではなくリニアックと小型サイクロトロンを用いる。リニアックではミュンヘン工科大を凌駕する世界最大強度の  $5 \times 10^9/s$  を目指す。これによって試料の動的過程を追うことなど、新たな展開が可能となる。またサイクロトロンを利用するビームでは、他に類をみないスピン偏極大強度ビームが得られる。これを利用すればスピントロニクスへの応用など、新たな研究の展開が可能である。

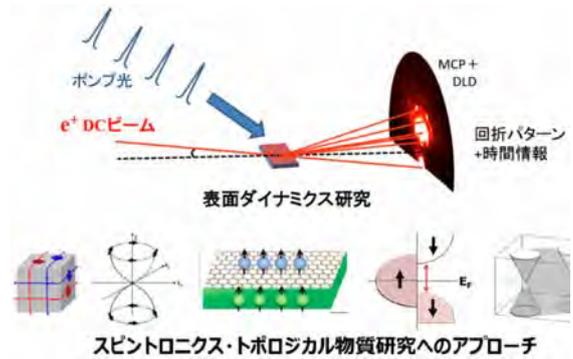


図1 大強度陽電子ビームによる発展の例

④ 実施機関と実施体制

本課題を実施するのは、日本陽電子科学会である。本計画に参加する日本陽電子科学会のメンバーの所属機関は、東北大学、原子力機構、量研、KEK、筑波大学、産総研、理研、千葉大学、東京大学、東京学芸大学、早稲田大学、東京理科大学、上智大学、立教大学、京都大学、大阪大学、大阪府立大学、広島大学、九州大学、鹿児島大学などである。他に、東レリサーチセンター等の企業の研究者もメンバーになっている。

本計画では、電子リニアックと小型サイクロトロンという 2 種類の加速器の特徴を生かした大強度低速陽電子ビームを相補的に利用する(図2)。その双方を KEK、もしくは量研高崎量子応用研究所に、あるいは電子リニアック法によるビーム装置を KEK に小型サイクロトロンによるビーム装置を量研高崎量子応用研究所に設置する。ただし他の研究機関や大学などがホストとなることもありうる。

⑤ 所要経費

建設費：70 億円

内訳	
設計調査	2 億円
建家設備	25 億円
線形加速器	20 億円
サイクロトロン	8 億円
陽電子生成部・陽電子ビームライン・計測機器	15 億円
運営費：10 億円/年	
光熱水	6 億円/年
液体窒素・ヘリウム	1 億円/年
装置保守・高度化	2 億円/年
建家設備保守	0.5 億円/年
安全・事務管理	0.5 億円/年

⑥ 年次計画

電子リニアックを用いたエネルギー可変陽電子ビーム施設建設・整備に必要な技術は、我が国の KEK や産総研をはじめとする各国の大強度低速陽電子ビーム施設ですでに確立したものを利用する。

サイクロトロンを用いたスピン偏極陽電子ビーム施設建設・整備については、医療分野 (PET 診断) で実績のある市販小型サイクロトロンを導入し、これまでに実績のある線源を中心に利用する。

装置等の開発・製作・設置

- 初年度 調査・基本設計
- 第2年度 詳細設計・実施設計、建屋建設
- 第3年度 加速器、陽電子ビームライン建設
- 第4年度 共同利用実験開始
- 第5年度 共同利用、成果創出

運用計画

- 教授 1 名 初年度～第5年度
- 准教授 1 名 初年度～第5年度
- 助教 2 名 初年度～第5年度
- 博士研究員 2 名 初年度～第5年度

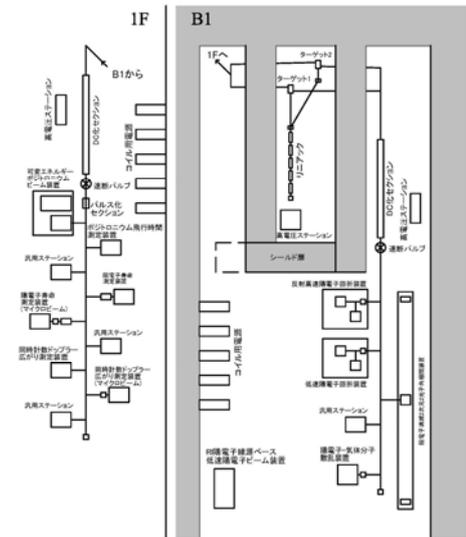
⑦ 社会的価値

代表的反粒子である陽電子を用いた基礎科学および材料科学の研究施設は、国民の科学に関する関心を高める。一般市民への科学普及活動にも力を入れ、陽電子の基本的性質や応用の原理、PET などの医療への応用の解説や反水素の合成などについての解説も幅広く行う。

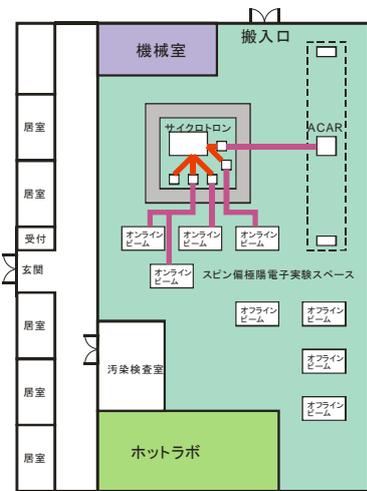
物質・材料の研究においては、特性・機能の研究と並んで構造(原子の種類や配置)の研究が重要な二本柱である。先端のエレクトロニクスや触媒研究などの表面研究においては、全反射高速陽電子回折法が構造解析の決定版となる有力な手段である。それによって表面構造を敏速かつ正確に決定すれば、構造から特性・機能を解明できる機会が増え、画期的な発展が期待できる。また明日の社会を支える計算機能力増大に対応するためには、低消費電力の半導体デバイスの開発が欠かせない。スピントロニクス技術はブレイクスルーとして注目されている技術であり、スピン偏極陽電子ビームを用いた各種スピン現象の解明や材料開発はスマート社会を目指すスピントロニクス技術の発展に大いに寄与する。また、半導体中の欠陥分布の計測も人類に貢献するデバイス開発には欠かせない。SDGs への貢献は大きい。

⑧ 本計画に関する連絡先

長嶋 泰之 (日本陽電子科学会)



電子リニアックによる大強度低速陽電子ビーム



小型サイクロトロンによる大強度低速陽電子ビーム

図2 施設案概要