

# 1

## 基本法則が世界を変える



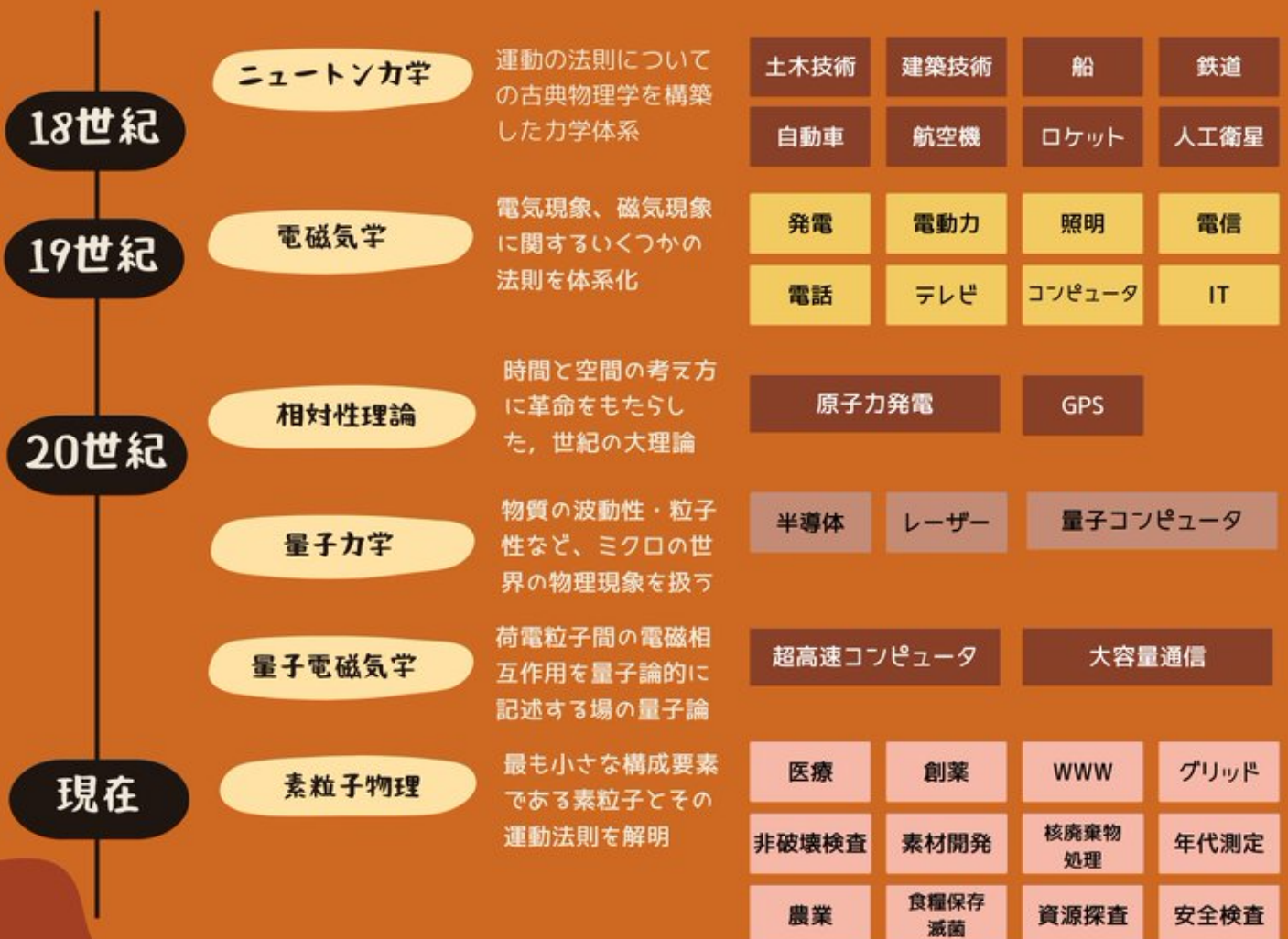
J.J. トムソン

物理の基本法則を探る研究は、わたしたちの常識や生活スタイルなどを劇的に変えて来た。最も顕著な例は「電子の発見」。発見当初はその正体すらわからなかった電子だけど、その性質や働く仕組みなどの法則がわかると、電力という生活インフラ、コンピューターや電化製品から医療用装置まで広く応用されて、今や、わたしたちの暮らしに無くてはならないものになっているよね！加速器を使った研究でも、色々な物理法則が解明されてきた。物理の基本法則がわかって初めて、何かに応用することができるようになるんだ

人類が理解しているのは宇宙のたった5%だけ！  
これからの研究でいったいどんなことが解明されて  
どんなイノベーションが生まれるんだろう？

ポイント

### 物理の基本法則からのイノベーション





# 2

## 加速器で診断する・治療する

加速器が設置されている施設で、もっとも数が多いのはどこだと思おう？ 研究所？ 工場？ 実は・・・病院なんだ！

その数1300台以上\*。病気の診断や治療に大活躍している

粒子を加速すると、物質を電離する能力を持つ放射線が発生する。この放射線をうまくコントロールすることで、からだの構造や機能を傷つけることなく検査したり、がんなどの治療を行うことができるんだ

\*公益社団法人日本アイソトープ協会「放射線利用統計2019」より



KEKでは、筑波大学と共同で陽子線がん治療の研究が1983年から18年間行われたんだよ！



### いろいろな医療用加速器



#### X線診断装置



1900年代当初から使われているX線診断装置も低エネルギー電子加速器の1種。電子線を金属ターゲットに当てて、X線を発生させるんだ

#### 陽電子放射断層撮影法 (PET)



体内に放射性薬剤を投与し、ガン細胞に取り込まれた様子を画像化する、有力なガンの早期発見方法。放射性薬剤は加速器を使って作っているんだ

#### コンピュータ断層撮影法 (CT)

体の周囲からX線をあて、その結果をコンピュータで計算して、体の断面を精密に画像化する。陽子などの粒子線を使った3D画像をつくる研究も行われているよ



#### 放射線治療装置

放射線を照射して体内のガン組織を破壊する治療法。X線、ガンマ線、電子線(ペータ線)、陽子、中性子、中間子などの粒子線が用いられている



#### 重粒子線治療装置



炭素、ネオン、ケイ素、アルゴンなどの重イオンを照射して体内のガン組織を破壊する治療法。ガン病巣をピンポイントで狙えるから、正常組織への影響を最小限に押さえられるんだ

#### 加速器研究からの新しい治療法

- 加速器実験では、目に見えない粒子を捉える高度な測定装置が必要だ。その技術が動く臓器のガン治療に応用されているよ
- 中性子と反応を起こすホウ素薬剤をガン細胞に集めて、加速器でつくった中性子ビームを照射して治療する「ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT)」は、これまで治療不可能だった病巣にも効果が期待できるんだ



# 3

## 薬を設計する



世界的に猛威をふるった新型コロナウイルス。未だに私たちの生活に大きな影響を及ぼしているよね。その脅威に対抗するために、世界中で新しい治療薬の開発が進められているね

現代の創薬研究では、病気の原因となるタンパク質がどのような立体構造をしているのかを調べて「薬剤設計」を行うことが主流になっているんだ。立体構造を調べるために使われるのが「放射光」。加速器を使ってつくられる「役立つ光」だ



人間の細胞と体内に侵入したウイルスなどの病原体のタンパク質が結合すると病気が発症する。つまり、病原体が侵入する細胞のカギ穴にピッタリのカギ=新薬を作れば発症を抑えたり体内での増殖を防ぐことができる。副作用を少なくすることも期待できるんだ。そのためには、結合のしくみ=カギ穴の形を知ることが大切。そこで放射光の出番だ！放射光から取り出したX線をタンパク質の結晶に照射すると、立体構造が詳しく調べられる。つまりカギ穴の形がわかるから、正確な薬の設計図がつかれるというわけ。放射光はこれまでも色々な薬の開発に役立てられてきた。今後も抗ガン剤や免疫抑制剤などの新薬を効率よく開発できるようになると期待されているんだ！



### 放射光をつかった創薬研究

KEKの放射光で行われた創薬につながる研究の一部を紹介するよ！

#### ウイルス増殖タンパク質の構造を明らかに

インフルエンザを引き起こすウイルスが増殖するために必要なタンパク質の立体構造を、放射光を使って明らかにしたんだ。どんなタイプのインフルエンザウイルスにも効き目がある薬を設計できる可能性があるんだって！

#### 新型コロナウイルスの感染を阻害するペプチドを発見！

「スパイクタンパク質」は新型コロナウイルスの体内への入り口の働きをする。放射光を使った研究で、このスパイクタンパク質を凝集することで感染を妨げる働きをするペプチドを発見したんだ。治療薬や診断薬としての活用が期待されているよ

#### 筋ジストロフィー症に関わる糖鎖を合成する仕組みを解明！

放射光を使って筋ジストロフィーの原因遺伝子産物であるFKRPの立体構造を調べて、その機能を明らかにしたんだ。病気の発生を防ぐ化合物・薬物を探することで、難病の筋ジストロフィー症の新しい治療法が開発が期待されているよ





# 4

## 車は加速器で作られる？

加速器からつくられる粒子のビームは、新素材の開発や強化、物質の表面処理などに使用され、工業技術の向上に深く関わっている

自動車を構成する部品は約3万点。鉄鋼、非鉄金属、ゴム、プラスチック、紙などさまざまな材料が各部品に用いられている。これらの部品の開発・生産過程で加速器が活躍しているんだよ

### 電子制御装置

自動車にはさまざま電子制御装置が使われている。それらの心臓部が半導体素子。半導体の素材であるシリコンに電子線を照射して、シリコン結晶のばらつきを制御。電流の流れをコントロールし、半導体の機能を向上させている

### エンジンルーム

エンジンルームの中で使われるさまざまな耐熱性電線の製造にも電子加速器が活躍している。電線の皮膜に使われるポリエチレン等のプラスチック類は、放射線照射によって溶剤や熱に強くなり、電気絶縁性・耐薬品性が増す。高温環境でも、熱や油等による摩耗を防ぐことができ、安全性の高い自動車の製造に役立てられているんだ



### 内装

自動車のインパネやシートなどのプラスチック製内装部品の多くは、その製造過程で放射線が照射されている。ドアやシートに使われる緩衝材、エアコンの断熱材などに使われる「発泡プラスチック」。型に入れたプラスチック基材の外側から放射線を当てて外形を固め、その後の加熱処理で内部に発泡を作る。車両の軽量化や、燃費の大幅な向上に役立っているんだ

### ラジアルタイヤ

国内で製造されるタイヤは年間約1.4億本。その90%以上がラジアルタイヤで、その90%以上が電子加速器を使って製造されている。原材料の生ゴムに放射線を照射すると、ゴムが強くなる。精度の高い成形も行えるから品質・安全性の向上にも役立つんだ



# 5

## 加速器で!?

# おいしくて安全な農作物づくり

おいしさ、安全性、価格… 様々なものが求められる農作物。これまでコストやリスクが大きかった農業分野の問題解決にも、加速器は一役かっている

### 害虫駆除

人工的に不妊化したオスの害虫を野外に放ち自然繁殖を防ぐ「不妊虫放飼法」は、農薬を使わない有効な害虫駆除の方法。加速器で生成した放射線を害虫の不妊化に使うんだ。日本では1970年代から行われて、沖縄などでゴーヤなどに大きな被害を与えていたウリミバエの駆除に成功！本土に輸送できるようになって、日本全国でゴーヤが食べられるようになったんだよ



発芽したじゃがいもの芽には有毒物質が含まれていて、食べると危険！放射線を当てて発芽を防止しているよ。照射に際しては、じゃがいもの吸収線量の上限などが定められているから、照射されたじゃがいもが放射能を帯びることはないんだよ

### 食中毒防止

### 品種改良



おいしい農作物をつくるために欠かせない品種改良。ここでも加速器が使われている。原子核を加速して作る「重粒子線ビーム」を植物に当てると、細胞内のDNAがダメージを受ける。細胞はダメージを自己修復しようと動き出すんだけど、その際、植物に突然変異が起こることがある。これを利用して、植物の色や形、性質を変化させることができるんだ

加速器を使った品種改良は、交配を繰り返す方法(5～10年かかる)よりも効率的(2～3年)。どんな品種になるか予想ができないという課題もあるけど、塩害に強い稲や、開花時期を調整し二季咲きにした桜など、開発に成功した事例が多数報告されているよ



### 光合成のしくみを探る



植物が光を浴びて栄養を生み出すしくみ「光合成」。植物がどのように光のエネルギーを化学エネルギー(栄養素)に換えているのか、そのメカニズムはまだ完全には解明されていないんだ

放射光を使うと、光合成がどのように行われているか、変化の様子をスナップショットで見えるように観察できる。次世代の放射光施設では、なんと10兆分の1秒レベルで化学反応を調べられるんだ！

サステナブルな社会実現への貢献が期待できるね



## 美術品や文化財を調べる

美術館や博物館、ピラミッドなど、意外な場所でも加速器や加速器実験から生まれた技術が活躍しているんだ。

様々な粒子が、壊さずに内部を調べることに利用されているんだね

### ルーブル美術館に加速器が！？

ルーブル美術館の地下には加速器がある！全長37メートルのAGLAE加速器は世界唯一の美術品専用加速器で、ヘリウムと水素の原子核を加速して物体に衝突させ、放出された放射線を捕捉して分析する。作品を傷つけることなく化学組成を分析できるので、作品が作られた年代や、絵画の下に描かれていた他の作品、また、本物が贋作か調べることもできるんだ



### 中性子を使って透視する

古代文化財は歴史的価値が高いし素材が脆くなっているから、触らないで調べることが原則になっている。だから、X線で調べる方法が1930年代から行われてきた。でも、金属と有機物が組み合わされた文化財を調べるのはX線では難しい。そこで使われるようになったのが中性子を使ったイメージングだ。

中性子は透過力に優れ、微小磁石の性質を持っているから、金属製の経筒に入った経巻も、画像として捉えて観察することができるんだよ。これまでに、仏像の胎内に隠された経巻が見つかったり、音が鳴る壺の中を調べて、何のために使われていたものなのかがわかったり、多くの秘密が解明されてきた

中性子は単独で自然界に存在しないから、加速器を使って人工的に作り出しているんだ



### 古墳やピラミッド…原子炉の中まで

X線は1メートル以上の厚みがあるものの中を見ることはできない。大きな建造物の中を見るために使われている粒子がミュオンだ。ミュオンは、地球の外部から大量に降り注いでいる宇宙線。ミュオンが物体を通過するとき、その通過しやすさは、物体の密度や内部構造によって変わる。そこで、検出器を置いて、どのくらいの数のミュオンが、どの方向から到達したかを測定するんだ。

KEKでは、加速器実験で使う技術を使ってミュオンを測定し、世界最大の「クフ王の大ピラミッド」に謎の巨大空間があることを突き止めたんだ！

この測定技術は、福島第一原発の1号炉から3号炉の燃料デブリの状態を観測するのにも使われた技術なんだ。さまざまな分野への応用の可能性が期待されているよ





## WWW

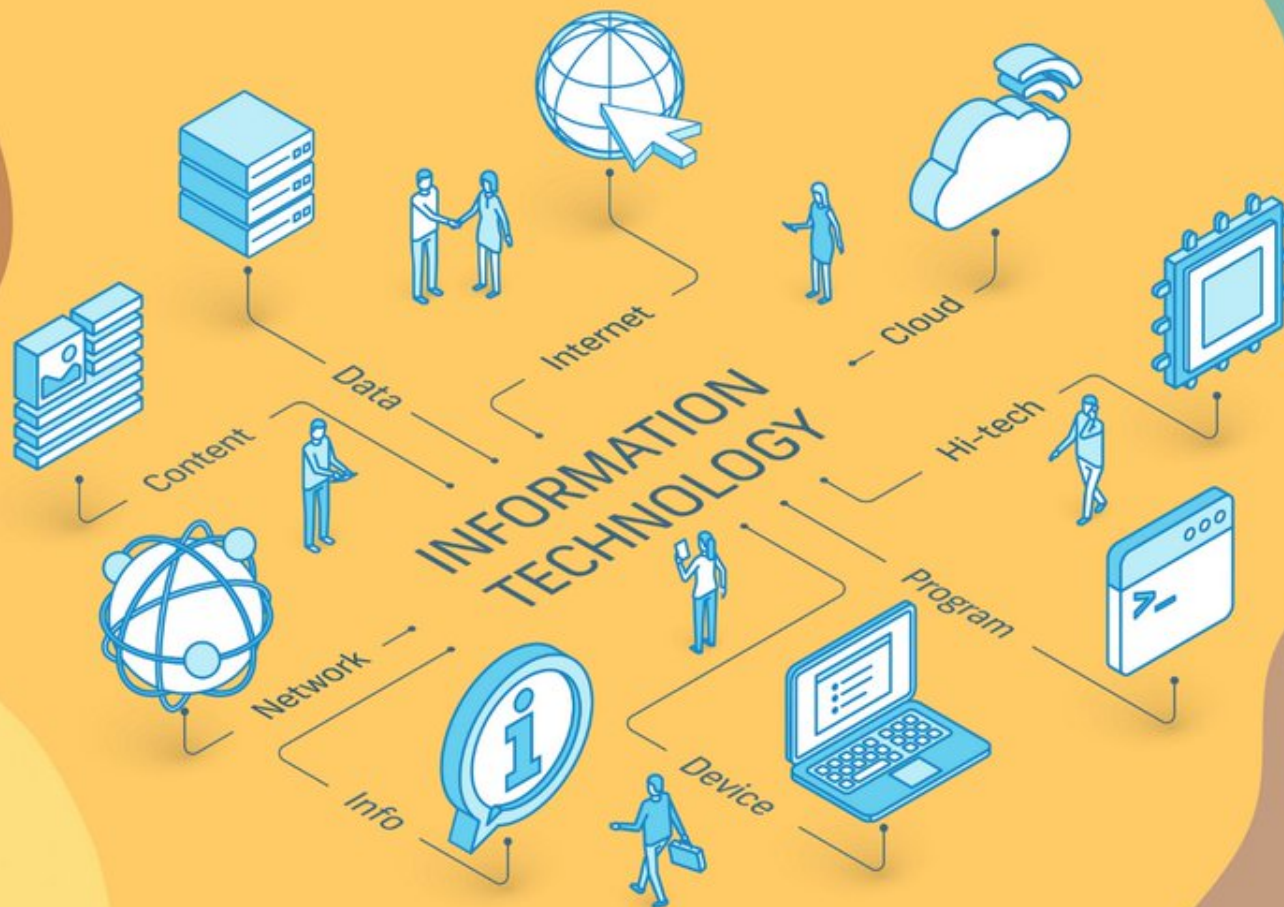
ワールドワイドウェブ(WWW)は、現在のインターネット全体のルールのようなもの。WWWの取り決めによって、ウェブページ間をジャンプして閲覧したり、画像や動画を楽しむことができる。WWWは、素粒子物理学の研究者たちが研究の情報を共有するためのツールとして開発されたのがはじまり。開発者の意向で、全世界に無償で開放されたため爆発的に広がり、現在のインターネットの形ができあがったんだ

## スパコン

素粒子や原子核の研究では、加速器で粒子を加速し衝突させてその反応を研究し、素粒子の世界の法則を探る。その法則を確かめるために、計算機を使って実験結果を再現できるかを計算するんだ。しかし、その計算量は膨大！そこで登場するのが、スパコンこと「スーパーコンピュータ」。KEKには一秒間に313.6兆回の精度の高い計算が可能なコンピュータがあり、素粒子の運動の様子を計算しているよ

現代社会に欠かせない様々なIT技術。

素粒子物理学の研究が生み出されたものや、素粒子研究によって進歩した技術があるんだ



## GRID

ヒッグス粒子を発見したCERN研究所で行われている大型ハドロン衝突加速器(LHC)実験は、ひとつの研究グループだけで約180の大学や研究所から3000人以上が参加している。そこで、各大学や研究所にあるコンピュータを接続して、あたかもひとつのコンピュータであるかのようにデータを扱うための技術として「GRID」が開発され、利用されているよ。多くのコンピュータをつなげて効率よくデータを扱う手法のひとつとして注目されているんだ

## 量子コンピュータ

素粒子物理学実験では、さまざまな検出器やエレクトロニクスを駆使して集めた大量のデータをコンピュータで統計解析して、どのような現象が起きているのかを突き止める。今後の加速器実験では、得られるデータ量が従来の数十倍にもなって、今のコンピュータでは解析が追いつかなくなる「計算爆発」が起こると考えられているんだ。それに対処するために、世界の素粒子研究者たちが量子コンピュータの研究を進めているよ



もともとは基礎研究のために開発された加速器や測定器。それらの技術を、安心・安全、環境にやさしい未来のために活用する取り組みが世界各地で行われているよ



### 効率的な 太陽光パネル

衝突型加速器で粒子の加速を最大化するためには「超高真空」の状態を作る必要がある。この真空技術が、ジュネーブ空港の太陽光パネルに活かされているよ。従来の太陽光パネルのなんと10倍も効率的に発電できるんだ！曇天の日や雪が積もっていても、パネルを80度に保つことができるんだって！

### 安全を守る

橋や高速道路の支柱など、鉄筋コンクリートの構造物の寿命は内部の鉄筋の状態が決まる。でも、腐食などの老朽化は表面からは見えないよね。ここで活躍するのが中性子ビーム。コンクリートの中の水分の分布や移動を非破壊で観察できるんだ！鉄筋コンクリート構造物の劣化診断や、構造物の耐久性を上げるための研究が行われているよ



### 危険なものを見逃さない！

違法な物品や武器などの密輸入を水際で防ぐ等、港湾でのセキュリティは安全な暮らしのためにとても重要だよ。ここでも加速器が活躍しているよ。国内では、貨物コンテナ用の大型X線検査装置が40台ほど稼働していて、電子型加速器が使われているよ。コンテナの内容物を精密に画像化できるから荷物の精査が容易になり、時間も短縮できるようになるんだ

### 水や空気を キレイに

加速器技術は、さまざまな処理に活用されている。韓国では排水の浄化に、ポーランドでは排気ガスからの有害物の除去に電子ビームを使っている。アメリカでは下水汚泥を安全性の高い農業用肥料に変える研究が進められているんだ。持続可能な未来に向けて、加速器技術の応用がすすめられているよ



### 核のゴミを 処理する

世界の発電量の約15パーセントを供給する原子力発電は、二酸化炭素を全く排出せずに大量の電力を安定供給できるけど、発電で生成される放射性廃棄物の処理方法が問題になっている。そこで注目されているのが「加速器駆動核変換システム(ADS)」。中性子ビームを使って、半減期が数百年の核種に変換することができる



### 火山の動きを探る

宇宙から降ってくるミュオンを使って火山内部の透視画像を得ることができる。火山のマグマ中の泡の動きや、対流を可視化することで、地震や噴火のメカニズムの解明を目指しているよ。欧州では、宇宙線望遠鏡を使って、活火山や地下断層のスキャンを行なっているんだ





素粒子物理学や加速器科学の研究は、宇宙のしくみや構成を解明するだけでなく、量子技術や人工知能、超伝導技術の基盤にもなってきたんだ。半導体やデータサイエンスなど、さまざまな分野で活躍する人材が育っているよ



### 子供たちが理系に進むきっかけを

英国では、大型ハドロンコライダー実験開始後に理系に進む学生が40%も増加したんだって！世界最先端の研究が身近にあることで科学に興味を持つ子供が増えたんだね

KEKでも、施設公開や各種スクールの実施、講師派遣プログラム「KEKキャラバン」など、未来の人材育成を目指す試みを進めているよ

努力を積み重ねていけば、遠く思える目標にも到達できることを教えてもらえました



C.Kさん：半導体分野で活躍

### 世界に博士を輩出

加速器を使う「高エネルギー物理学」の研究室がある大学は国内に40校。そこから毎年30名程度の博士たちが生まれているよ。KEKの施設で行った研究で博士号を取得する海外の研究者もとても多いんだ。

国際リニアコライダーが日本にできれば、その数はどんどん増えることになるね！

現在の「最初から最後まで自分でほぼ全部やる」業務スタイルは、実験と同じですね

### 民間企業で働く博士たち

物理学を学んだ人たちは、いろいろな分野で活躍している。博士号を取得した人の約2割が民間企業に就職して活躍しているよ。

情報通信や半導体などの専門分野はもちろん、金融や保険といった、一見関係なさそうな分野に進む人も多いた。ウォール街にも物理学者がたくさんいるんだって！データ解析能力が役立つんだね

国際チーム内で最高の解析結果を競い合う環境で仮説検証能力を鍛えられたのは大きな財産です



Y.Sさん：人工知能分野で活躍

T.Yさん：量子コンピュータ分野で活躍



# 10 未来の可能性 いろいろ

## 安全

電子ビームをアスファルトに照射すると丈夫で長持ちするようになる。超伝導技術で加速器を小型化して車に積み、走りながら劣化した舗装の修理したり、効率的に丈夫な道路を舗装することが検討されているよ。

電子ビームは、壊さないで内部の様子を見ることにも使える。トンネルや橋などの内部の亀裂を、小型化した加速器で走りながら調べることができれば、大きな事故のリスクを減らすことができるね！

インフラの整備や安全性の維持への応用が期待されているよ！

SAFETY FIRST

## IT

さまざまなものがネットワークで繋がっている現代。この情報通信社会を支えているのが半導体だ。半導体の高集積化、高性能化、低消費電力化のカギを握るのが「微細加工技術」。加速器が生み出すレーザーを使ってシリコンウェハに細かいパターンを形成している

半導体の性能をさらにあげるために研究が進められているのが、超伝導技術加速器を使って一桁以上波長が短いレーザーをつくる技術。今の40倍の強度を目指しているんだ！

半導体が使われるのはITだけじゃない。産業全体に関わる取り組みだね！

## 医療

近くに大きな病院がない人は、検査や治療を受けるのも大変。PETなどの検査装置や放射線治療装置を超伝導技術で小型化、車に搭載すれば、誰でも検査や治療を受けられるようになるよ。

正常細胞にほとんど損傷を与えず、がん細胞をピンポイントで破壊する加速器を使った注目のガン治療法「BNCT」。BNCTは、これまで治療が難しかった種類のガンも治療できるんだ。超伝導技術でこの装置を小型化することが検討されているよ

装置の小型化や新しい治療法の開発で、患者さんの負担を減らすことが期待できるね！



## 超伝導加速技術

次世代の加速器「国際リニアコライダー (ILC)」に使われる超伝導加速技術。装置の小型化や省エネ化、高性能化に役立つので、さまざまな分野への応用が期待できる。すでに色々な検討が開始されているんだよ！

超伝導空洞はILCの心臓部。ILCには8000台を超える空洞が必要なんだ。加速器以外にもいろんな用途で役に立ちそうだね！

## POINT

## エネルギー

発電所から家庭や事業所に送電する時、電気抵抗で5%の電力が失われている。これは原発6基分に相当するんだって！電気抵抗がゼロになる超伝導の技術を使って送電ロスもゼロにしようとしているんだ

次世代エネルギーの期待がかかる核融合施設でも超伝導加速器技術が使われることになっている

超伝導の特性を活かして電気エネルギーを磁気エネルギーとして貯蔵する超電動蓄電の研究も進んでいるよ

超伝導技術でエネルギー問題に対応するさまざまな方法が検討されているよ！



## 環境

電子ビームや超電動磁石は、土壌や水、空気中の有害有機汚染物質を分解・除去することにも使えるんだ。世界各地で実用化に向けた産業用加速器の研究が行われているよ

将来の産業応用の有力候補の1つが加速器を使って核のゴミを減らす「加速器駆動核変換システム(ADS)」。原子力発電から生じる核廃棄物は無害化するまで非常に長い年月がかかる。ADSは、長寿命核種を短寿命核種または非放射性核種に変換することができるんだ！

超伝導加速技術は、環境をまもるためにも使えるんだね！

Go Green