

国際リニアコライダー

その展望とKEKの取組み

VOL

04 ILCの波及効果

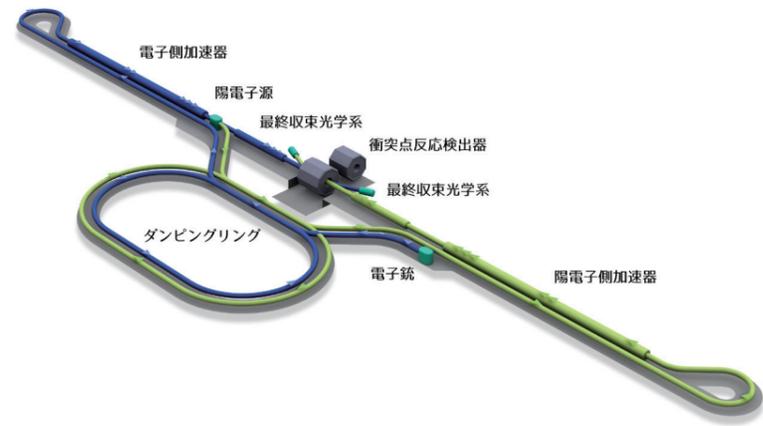
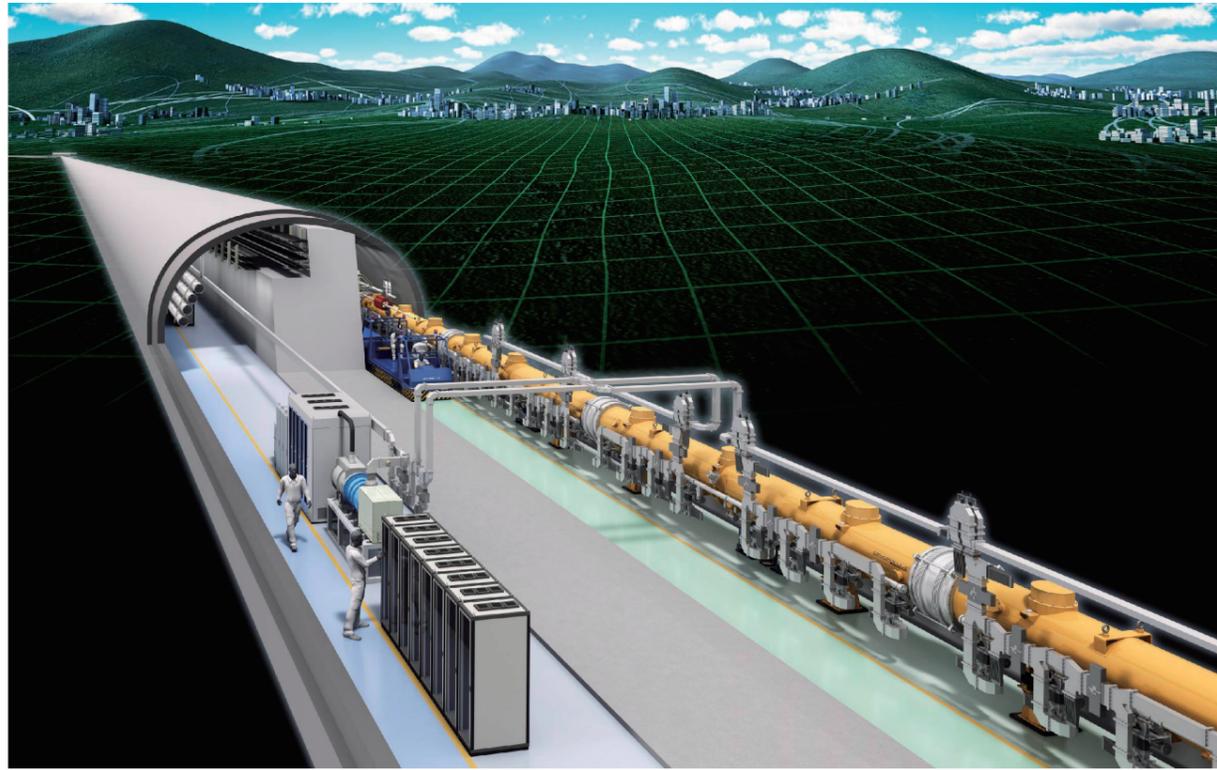
TABLE OF CONTENTS 目次

この冊子について

この冊子は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行っている活動を中心に、国際リニアコライダー(ILC)計画の概要とその意義を解説するものです。

4分冊構成になっており、第1分冊では全ての項目を網羅した概要を解説しており、第2～第4分冊では各項目をより深く解説しています。

- 01 第一分冊 概要
 - ILCがもたらす知の革命
 - ILC提案のこれまでの歩み
 - ILCのインパクト
 - ILC実現に向けて
- 02 第二分冊 ILCの物理
 - 素粒子物理学の目指すもの
 - 加速器実験
 - 標準理論:物質粒子と力の粒子からなる世界像
 - 標準理論の成功と限界、残された深い謎
 - 岐路に立つ素粒子物理学
 - 三つの道と残された謎
 - ILCが探索するエネルギー領域
 - ILCの卓越した能力
 - ILCがもたらす知の革命
- 03 第三分冊 ILCの加速器・測定器
 - 実験装置の概要
 - ILC加速器の特色、構成、役割
 - ILC加速器を支える技術
 - 物理実験・測定器技術
 - 建設実現への道
- 04 第四分冊 ILCの波及効果
 - 人類の知的資産への貢献
 - 人材育成への貢献
 - 産業への波及
 - イノベーションへの波及
 - ILC準備においてすでに表れている波及効果



上 / ILC完成予想図
左 / ILC模式図 ©Rey. Hori

国際リニアコライダー (International Linear Collider, ILC) は、地下約100メートルのトンネルに設置する将来型電子・陽電子衝突加速器です。世界最高エネルギーまで「電子」とその反粒子「陽電子」を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速して正面衝突させ、そこから引き起こされる素粒子反応を研究します。ILCは全長20キロメートル、重心系エネルギー250ギガeV電子ボルト(GeV)の加速器として開始する計画です

刊行にあたって

ILC: 第二加速器文明の入口



今、私たちは20世紀から21世紀にかけての科学技術真っ盛りの時代を生きています。この時代を可能にした発明の一つが加速器だと思います。初期の加速器の代表格は、1930年代に原子核のことを調べるために作られた小さなサイクロトロンでした。その後加速器は極めて大きな進歩を遂げ、周長が山手線と同じくらいのもまで作られています。これによって、1センチの十億分の一のさらに十億分の一くらいの素粒子の世界を支配する法則が良くわかるようになりました。

このことは同時に、宇宙の誕生のごく初期に何が起こったのか自信をもって説明できるようになったことを意味します。また、加速器からの光や中性子を使って実際に目に見える物質がどのような構造をしているかわかるようになり、さらに生命体のような非常に複雑な分子がなぜ多様な機能を持つかなどということも明らかになってきました。

加速器のもたらす恩恵は科学においてだけにとどまりません。工業的利用や医療への応用などもどんどん広がりを見せ、人間の生活にも現実的な貢献ができるようになってきました。これら加速器がもたらした成果を数百年後の子孫が振り返ったとすれば、20世紀から21世紀にかけては加速器の急速な進歩によって人類の自然理解が急速に深まり、その応

用によって人類に恩恵をもたらした、いわば加速器文明の時代だったということになると思います。この文明のけん引役を果たしてきたのが素粒子などの科学研究に使われてきた先端性の高い大型加速器です。

その大型加速器は今、絶頂にあります。円形の加速器、特に電子加速器においては限界が見えだしたのも事実です。ここに大きな希望となるのが直線型の大型加速器です。円形加速器が80年かかって挙げてきた大きな成果を、まっすぐな加速器が受け継いで次の100年でさらに大きく発展させ、いわば第二加速器文明の入り口となるのがこの冊子で説明する国際リニアコライダー(ILC)です。

ILCは素粒子物理学の発展に大きく寄与することが期待されます。ここから始まる第二加速器文明によって我々の想像をはるかに超えた成果がもたらされるに違いありません。80年前にサイクロトロンを発明したローレンス博士は、加速器文明がここまで到達するとはおそらく想像していなかったと思います。これからの第二加速器文明についてもいったい何がおこるのか、全貌が見えるのは百年先かもしれません。後進に夢を託して走り始めることが、転換期にある文明を担う我々の使命ではないかと考えております。

山内 正則

高エネルギー加速器研究機構 機構長
ILC推進準備室 室長

第四分冊：はじめに

04 ILCの波及効果

刊行にあたって3
人類の知的資産への貢献6
人材育成への貢献8
産業への波及10
イノベーションへの波及18
ILC準備においてすでに表れている波及効果30
波及効果に関するその他の調査35
参考文献36

国際リニアコライダー（International Linear Collider, ILC）は、世界最高エネルギーまで、電子とその反粒子である陽電子を正反対の方向からそれぞれ直線状に加速して正面衝突させ、そこで起こる素粒子反応を研究する実験装置です。ILCの実験は、究極の自然法則と宇宙の始まりの謎の解明を目指します。次世代エネルギーフロンティア加速器実験施設として、電子・陽電子リニアコライダーが必要であるとして、世界の高エネルギー物理学研究者コミュニティは、国際的な枠組みで研究開発と設計作業を行ってきました。科学的意義と実験施設の技術的完成度から判断して、今、実現に向けて大きく踏み出す時期だと考えます。

高エネルギー加速器研究機構（KEK）は、日本の加速器科学の総合的発展の拠点として、新しいサイエンスや応用研究のフロンティアを推進してきました。5年間の具体的な研究計画「KEKロードマップ」を策定、ILC計画については、「日本がホストするILC計画を推進するために国際準備組織を立ち上げ、装置、施設・設備、研究所組織の詳細設計などに取り組み、国際協力の枠組みによる建設着手を目指す」と記載しました。KEKはILC推進準備室(室長：山内正則機構長)を設置し、機構内外と連携してILC計画実現に向けた活動をしています。今回はILC計画の理解増進活動の一環として、本冊子を編纂しました。

第4分冊では、加速器がこれまで社会にどのような波及効果を及ぼしてきたのか、KEKの活動を中心に紹介するとともに、ILCの波及効果について考察します。

人類の知的資産への貢献

加速器で生み出された成果は、素粒子物理学の発展に大きく寄与し、多くのノーベル賞受賞にも貢献しています。ここでは、KEKの加速器を中心に実例を説明します。

「KEKB加速器」はKEKつくばキャンパス地下11メートルのトンネルに設置した周長3キロメートルの電子・陽電子衝突型加速器です。電子、陽電子の二つの蓄積リングとそれらに電子、陽電子のビームを入射する線形加速器から構成されます。ビームは逆方向に走り、1点で衝突するように設計されています。衝突点に設置された約8メートル立方の巨大なBelle(ベル)測定器が、この衝突によって起こる素粒子反応を捉えます。

「Belle実験」は、世界15ヶ国約60の大学と研究機関に属する約400名の研究者によって行われた国際共同実験です。電子と陽電子の衝突で大量に生成される「B中間子」を調べ、2001年にB中間子の崩壊に「CP対称性の破れ」があることを発見しました。

CP対称性の破れは、ひとつの物理現象とそれを「CP反転」させた現象の間に違いがあることを意味します。CP反転は物質を反物質に変える役目をするので、CP対称性に破れ(違い)があると、物質と反物質の振る舞いに違いを引き起こします。なぜ宇宙には物質と反物質が同じ数存在せず、主に物質だけが存在するのか、という謎を解く鍵となることが期待される現象です。Belle実験でのCP対称性の破れの発見は、2008年の小林誠KEK特別栄誉教授と益川敏英京都産業大学教授、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構長・特別教

授のノーベル物理学賞受賞へとつながりました。

KEKB加速器は2010年に運転を停止。高度化に向けて改造を行い、2018年の本格的な運用開始を予定しています。改造後の加速器「SuperKEKB」はKEKBの40倍の衝突効率を目指しています。測定器もBelleからBelleIIに高度化され、約50倍の量のデータを収集解析する予定です。この高度化で、KEKBで40年かかるデータの収集が、わずか1年で可能になります。SuperKEKBを使って行われるBelleII実験は、粒子・反粒子の対称性の破れや、宇宙初期に起こったはずの極めて稀な現象の再現に挑戦し、未知の素粒子やその性質を明らかにすることを目指しており、ノーベル賞級の成果が期待されます。

2012年7月、欧州合同原子核研究機関(CERN)が質量の起源とされる「ヒッグス粒子」と見られる新粒子の発見を発表しました[参考文献5,6]。この発見は、CERNの周長27キロメートルの円形加速器「大型ハドロン衝突型加速器(LHC)」とATLAS/CMS測定器による実験の成果です。2013年、この発見により「ヒッグス機構」を提唱した、ピーター・ヒッグス、フランソワ・アンブレール両氏がノーベル物理学賞を受賞しました。ほかにも大型加速器を用いた素粒子実験がノーベル物理学賞に貢献した例がたくさんあります(表1)。

ILCの実験でも、ノーベル賞級の研究成果が期待できます。ILCは素粒子である電子と陽電子を人類未踏のエネルギーで衝突させるので、今まで見つけられなかった新粒子を発見する可能性があります。新粒子の発見は、人類が知らない物理法則が存在することを意味します。

すでに存在が知られているヒッグス粒子の精密測定が最重要課題です。構造を持たない「素粒子」なのか、自然には力の統一の鍵と考えられている超対称性は存在

するのか、といった現代素粒子物理学の疑問を明らかにします。LC実験でこれらの疑問に対する新たな発見があれば、「標準理論」の枠を超える発見となり、人類の知的資産の蓄積に大きく貢献するでしょう。

KEKBやLHCは過去の資産を活用して建設され、アップグレードを経て新しい実験に取り組み、さらなる成果が期待されています。新しく建設されるILCもノーベル賞級の成果を次世代に引き継がれることでしょう。

受賞年	氏名	加速器名等	受賞理由
1939	E. ローレンス	サイクロトロン	サイクロトロンの発明・開発およびその成果、特に人工放射性元素
1951	J. コッククロフト	コッククロフト・ウォルトン型 静電加速器	人工的に加速した原子核粒子による原子核変換 についての先駆的研究
	E. ウォルトン		
1959	E. G. セグレ	Bevatron (U. C. Berkley)	反陽子の発見
	O. チェンバレン		
1961	R. ホフスタッター	線形加速器 (SLAC)	原子核の電子散乱の研究と核子の構造に関する 発見
1976	B. リヒター	SPEAR (SLAC)	J/ψ 粒子の発見
	S. C. C. テイン(丁肇中)	陽子シンクロトロン (BNL)	
1980	V. フィッチ	陽子シンクロトロン: AGS (BNL)	中性 K 中間子崩壊における基礎的な対称性の破れ の発見
	J. クローニン		
1984	G. ルビア	SPS (CERN)	ウィークボソンの発見
	S. ファン・デル・メーア		
1988	L. M. レーダーマン	陽子シンクロトロン: AGS (BNL)	ニュートリノビーム法の開発とミューニュートリノの 発見によるレプトン二重構造の実証
	M. シュワルツ		
	J. シュタインバーガー		
1990	J. I. フリードマン	e-p+ 深部非弾性衝突実験 (SLAC)	電子と核子の非弾性散乱によるクォーク模型の検 証
	H. W. ケンドール		
	R. E. テイラー		
1995	M. L. パール	SPEAR (SLAC)	タウ粒子の発見
2008	小林誠	実証実験: KEKB (KEK)、PEP-II (SLAC)	CP 対称性の破れの起源の発見
	益川敏英		
2013	P. ヒッグス	実証実験: LHC (CERN)	欧州原子核研究機構 (CERN) によって存在が確 認された素粒子(ヒッグス粒子)に基づく、質量の起 源を説明するメカニズムの理論的発見
	F. アンブレール		

表1 / 加速器を用いた実験によるノーベル物理学賞受賞リスト



人材育成への貢献

先端技術を駆使した加速器の建設には、世界の研究者・技術者が一体となって取り組む必要があります。加速器完成後は、研究者が引き続き滞在してデータの解析や加速器の運用を行います。加速器は加速器科学を取り巻く知の拠点となり、未来の人材育成の拠点としての役割も果たします。その実例として、KEK加速器が人材育成にどのような役割を果たしてきたのか紹介します。

KEKは大学共同利用機関法人として国内外の研究者と共同研究を行い、共同利用の場を提供し、大学の高度な教育・研究を支え、最先端の加速器科学や関連分野の研究に貢献しています。2016年度の共同研究者等の受入人数は7,606名。そのうち外国機関からの受入人数は1,733名です。国際学術交流協定も100件を数えます。

KEKは、大学共同利用機関の最先端の研究環境を活用した、1988年に日本初の大学院大学として創設された「総合研究大学院大学(総研大)」の高エネルギー加速器科学研究科の基盤機関となっています。加速器科学専攻、物質構造科学専攻、素粒子原子核専攻の3専攻があります。

加速器科学専攻では、加速器性能の向上を通じた自

然科学の推進を主目的に、加速器の原理や先端的加速器技術の研究など、理論・実験の両面から教育を実施しています。物質構造科学専攻では、大型加速器から発生する放射光、中性子、ミューオン、低速陽電子の四つのビームを用いて、物理・化学・生物・医療などの様々な分野における物質構造の研究を行っています。素粒子原子核専攻では、高いエネルギーで大強度粒子ビームを使った実験によって素粒子・原子核の性質を明らかにする研究と、宇宙から超弦理論までカバーする理論研究を行っています。

本研究科は2006年に5年一貫制博士課程となり、2017年9月までに133名の博士を輩出しました。そのうち海外からの留学生は34名(約25%)を占めます。国際的な研究拠点であるKEKでは、国内外の多数

の研究者と日常的に接触できる理想的な教育環境の中で、367名(2017年9月現在)の教員が、個人の能力に即した教育を行っています。修了後には70%の人材が、KEKや大学・研究機関で研究者として活躍しています。

先端技術のかたまりであるILCは、物理実験のみならず先端加速器の研究テーマも幅広く内包していることから、リニアコライダー関連の研究で博士号を取る学生も増えてきました。ビーム制御や超伝導空洞開発だけでなく、高精度電磁石設計や低温技術、大電力高周波系や制御などの最新の研究成果がILCに活かされています。

ILCが日本国内に建設されれば、これまでの研究開

図1 / KEKでは、総研大での教育に加え、多くの中高生の見学・実習受け入れも行なっている。また、全国に研究者を講師として派遣する「KEKキャラバン」プログラムも提供している

産業への波及

加速器を構成する部品は多岐にわたります。粒子を加速する加速空洞、空洞に高周波電磁波を供給するクライストロン、ビームを軌道にそって走らせる「電磁石」、その電源、ビームの通り道を真空に保つビームパイプ、真空ポンプ、加速器の全構成部品を遠隔操作する制御システムなどがあります。各部品から最大限の性能を得るために、研究者とともに様々な企業が果敢にチャレンジしました。KEKに関わる加速器や実験装置を製作した企業への調査結果では、約6割の企業が技術力を得たという調査結果でした。加速器や測定器の完成後にその効果が現れることが多いことから、様々な形での波及効果が期待されると考えられます。ま

た、波及効果が認められる分野も多岐に渡っています(図2)。

KEKB加速器の建設には、150社を超える企業が参加しました。ILCの建設では、より多くの企業の参加が見込まれます。これまで加速器建設に必要とされてきた分野に加えて、ILCの実現のために新たに必要と予想される技術・製品分野も抽出されており、さらなる産業波及が期待されます(図3)。

加速器の構成部品と、そこからの波及効果をご紹介します。

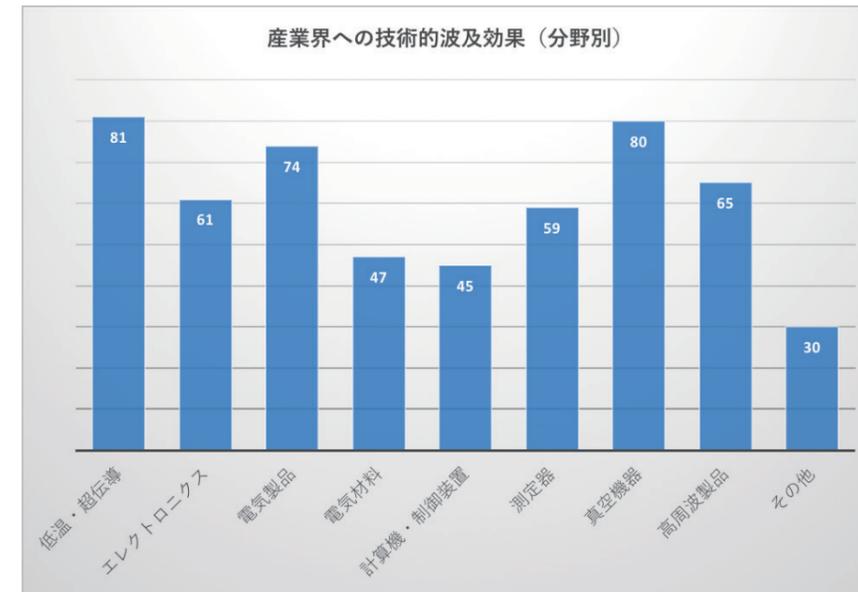


図2 / 民間への波及効果アンケート結果

KEK加速器の産業波及効果, 大強度陽子加速器施設計画評価専門部会(第3回)資料から作成

ILC開発の技術分野	想定される新規開発分野
超伝導技術	ILCの超伝導加速空洞の電界(加速勾配)性能向上 量産化(生産工程効率化に向けたロボット導入)
製作技術	空洞の溶接、表面処理技術(電解研磨、ドーピング、コーティング等)
大電力高周波技術	クライストロンの性能向上(電力変換効率改善、RFコンディショニングの時間短縮、超高真空技術等) 上記の量産化技術の開発 カプラー、導波管、導波管素子(ダミーロード、サーキュレータ等)の性能向上 上記の量産化技術の開発
ビーム発生制御・収束技術	陽電子・電子ビーム発生技術 ILC固有のナノ・ビームの制御・安定化、高精度タイミング技術 精密計測
検出技術	検出器(測定器)の高性能化に関わる技術 大量に発生する粒子衝突情報の処理技術
ソフトウェア技術	ILC全体の高精度のマシンコントロールとフィードバックシステム エンジニアリング管理、データマネジメント

図3 / ILC建設から派生されると想定される新規開発分野

国際リニアコライダー(ILC)計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析 資料から作成

加速器

加速器の開発過程では様々な技術開発が行われてきました。1960年代から企業との協力で加速器開発が開始されました。既存の精密加工技術などを基礎として常伝導加速管の製造から開始し、これまでにKEKB加速器の入射器やJ-PARCリニアック用のACS空洞などがKEKに納入されました。これらの製造にあたり、無酸素銅の超精密加工や真空ロウ付けの技術が発展しました。

1981年から超伝導加速空洞の開発がトリスタン加速器向けに開始されました。トリスタンは世界で初めて超伝導空洞が本格的に実用化された加速器で、1989年までに32台の5連空洞が製造されました(図4)。また、KEKBやコンパクトERL(エネルギー回収型リニアック)向けの超伝導空洞の開発過程では、純ニオブ材の塑性加工や電子ビーム溶接技術が開発

されました。

これらの研究開発で培われた加速器技術は、民生品へと活用されています。顕著な例は、放射線治療装置の開発です。加速管製造技術を活かして、従来の3分の1の大きさのX線発生装置(加速器の全長30センチ、重量10kg、電子ビーム出力6MeV)を開発し、世界で初めて動体追尾照射が可能な治療装置が実用化されました。現在、18施設以上の病院で治療に使われています。



図4 / トリスタン加速器用五連超伝導加速空洞 (三菱重工製)

クライストロン(大電力高周波発生装置)

クライストロンは、加速空洞で粒子の加速に用いる高周波(RF)電力を供給する装置です。真空管の1種で、1970年代まで主力はUHF放送送信機用の出力10~30キロワットの連続波(CW)のクライストロンでした。

加速器のためには大出力のクライストロン開発が必要で、企業との共同開発が進められてきました。2017年に運用を開始したSuperKEKB加速器の主加速器には、1.2メガワットのCWクライストロンが、入射器には100メガワットのパルス型クライストロンが使われています。

加速器建設に向けて共同開発を行ったクライストロンには、独創性の高い多くの技術が用いられています。クライストロンの本体から導波管にマイクロ波を取り出す部分には出力窓としてセラミック部品が使用されます。内部の真空を保ち、同時にマイクロ波をスムーズに通過させることが要求されます。RF出力を上げて、あるレベルに達すると放電が生じます。この問題を解決するために、導波管変換部を調整したり、セラミックに窒化チタンコーティングを施すなどの工夫が施されました。

トリスタンと KEKB 加速器の電子と陽電子の加速用に共同開発されたクライストロン(図5)は、世界一安定で高出力であることが認められ、2014年に独立行政法人国立科学博物館が認定する「重要科学技術史資料(愛称：未来技術遺産)」に登録されました。

最近では、10メガワットパルス出力マルチビームクライストロンが開発されました。これは欧州XFELに採用されおり、ILCでの採用も期待されています。



図5 / 未来技術遺産に登録されたクライストロン (東芝電子デバイス製)

超伝導磁石

円形加速器の高エネルギー化にともない、ビームを曲げるために磁場を高めることが求められ、1960年代から加速器に用いられる超伝導磁石の研究開発が始まりました。1970年代には企業との共同開発に発展し、KEKの陽子加速器ビームラインに日本で初めて採用されました。2008年にはJ-PARCニュートリノビームライン用に全長150メートルの超伝導磁石システムが導入されました(図6)。CERNのLHC加速器の超伝導磁石の開発にも、KEKや日本の企業が大きく貢献し

ました。最近では、SuperKEKB衝突点でナノメートルレベルのビームサイズを実現するための衝突点用超伝導4極磁石が開発されました。

超伝導磁石技術は、理化学研究所、日本原子力研究開発機構(JAEA)やSPring-8でも活用されています。

派生技術としては、医療用の磁気共鳴断層撮影装置(MRI)用の超伝導磁石が挙げられます。現在の主力は1.5テスラ超伝導磁石であり、軽量小型化の取り組みは今も継続されています。



図6 / J-PARCのニュートリノ実験用ビームラインの超伝導磁石

超伝導材料：ニオブ

ニオブは超伝導元素のレアメタルで、ILCの超伝導加速空洞の重要な材料です。ニオブの主たる用途は鉄鋼添加剤です。自動車のボディーなどの鋼板に使われており、世界の需要の90%程度を占めています。一方、超伝導加速空洞に用いられるニオブは極めて高純度のニオブです。

1985年にKEKはトリスタン加速器用の高純度ニオブを企業と共同開発しました。この高純度ニオブは、KEKB加速器のクラブ空洞やドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)、米フェルミ国立加速器研究所(FNAL)等の海外の研究所でも採用されています。

海外から輸入した純度の低いニオブを電子ビーム溶解炉で溶解を繰り返して精錬し、純度を高めます。その後、鍛造、圧延、表面研磨、熱処理等を経て、板材等にします。

ニオブの純度を示す指標は残留抵抗比(RRR)で、値が大きいほど純度が高くなります。トリスタンのころのRRRは20程度でしたが、最近では500を超える純度の非常に高いニオブが製造可能になっています。

ILCの超伝導空洞製造には200トン以上のニオブ材が必要ですが、数年で製造が可能な技術レベルに達しています。最近では、精錬後にインゴットからディスク

を切り出して空洞の素材とする技術が成熟しつつあります。この技術は大幅なコスト削減に役立つと期待されています(図7)。



図7 / インゴットから切り出されたニオブディスク

光検出器技術

KEKB加速器の実験に使うBelle測定器は数種類の検出器から構成されています。衝突点の近くに配置される飛跡検出器(SVD)には、シリコンストリップ飛跡検出器(SSD)が使われています。フォトダイオード技術とIC技術を融合し、超小型・高精度の検出器を実現しました。基板上に数ミクロンから数十ミクロン幅で受光部が形成されており、高エネルギー粒子の入射位置をミクロン単位で検出できます。信頼性が高く、低ノイズ、優れた放射線耐性等の特長があり、LHC加速器の2つの測定器にも使用されています。

KEKは企業との協力で「PPD」と呼ばれる半導体光検出器(図9)を開発しました。PPDはピクセル化されたアバランシェ・フォトダイオード(APD)の信号の和を並列に読み出すことで、信号の読み出しを大幅に高速化します。センサ受光部面積が1平方ミリメートルと小さく、たくさん並べることで細分化した信号を読み

出すことができます。また、光電子増倍管に並ぶ増幅率と光子検出効率、磁場に対する耐性などの特質を有します。光電子増倍管は磁場に弱いため磁石内部に設置することができず、光ファイバーなどで測定器の外に引き出す必要がありました。PPDは磁石の内部に置くことができます。

PPDは応用範囲が広く、2006年には商品化されました(図6)。J-PARCのニュートリノ前置検出器にも62000個が使用されています。ILCでは、カロリメータの細分化した光信号読み出しに用いる予定です。医療用の陽電子放射断層撮影(PET)の検出器への応用も検討されています。

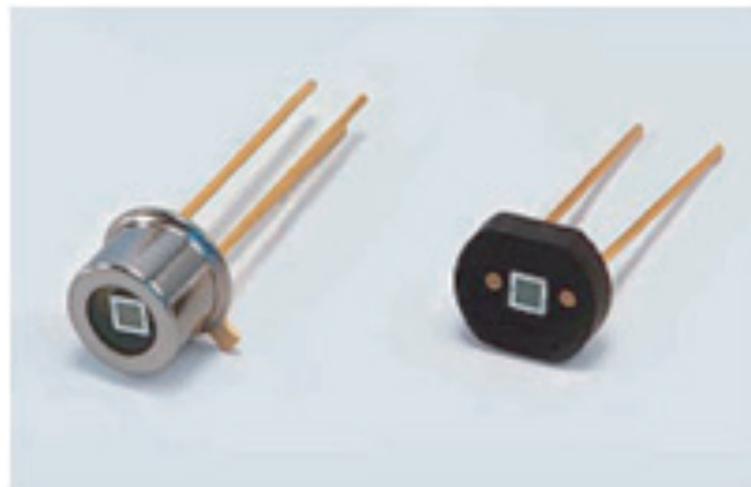
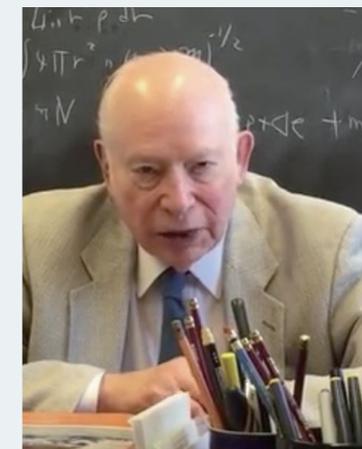


図6 / 商品化されたPPD (MPPC)
画像提供:浜松ホトニクス

ILCは国際協力が進められ、各部品の製造も国際分担で行われます。ILCの実現には、国内外の多くの企業が重要な役割を果たします。国家ブ・国際プロジェクトに参画することで、企業のプレゼンスが上がり、ビジネス展開できます。何よりも難題にチャレンジすることで、技術開発が加速し、人が育つ波及効果があります。新たな雇用が生まれ、地域の企業が競争力をつける波及効果もあります。ILCの運用期間を含めると、長い年月の雇用が期待できます。派生する関連産業分野の企業立地の創出も期待できます。大型加速器を有するCERNの先行例を参考に、KEKも先端科学技術の産業集積に尽力します。



ILCで加速器の建設に携わり、加速器を使うこともできる次世代の科学者のトレーニングはもとより、加速器科学からの技術的なスピノフは、とりわけ実りの多いものになります。例えば、宇宙開発等よりずっと有益だと私は思います。なぜなら、オンライン・コンピューティングや、高磁場技術、冷凍技術など多岐の分野にわたるからです。

今こそ、日本がその技術力を持って、リーダーシップを執り始める時です。私は、この新しい加速器プロジェクトを日本がホストすることは、日本にとって賢い選択だと思えます。

スティーブン・ワインバーグ博士(1979年ノーベル物理学賞)
ILC応援メッセージより抜粋

イノベーションへの波及

最近よく耳にする「イノベーション」という言葉。新しいアイデアから社会的意義のある新たな価値を創造し、大きな変化をもたらす変革を意味します。この章では、加速器と○○が新結合すると、何かが生み出されるという観点から実例を紹介します

加速器とIT

現代社会に欠かせないIT技術にも、素粒子物理学は大きな貢献をしています。ワールドワイドウェブ(WWW)は、現在のインターネットの基本ルールのようなもので、WWWの取り決めによって、私たちはウェブページ間をジャンプして閲覧し、画像や動画を楽しむことができます。WWWは、HTMLという言語で作成されますが、これを発明したのは欧州合同原子核研究機関(CERN)の研究者です。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です。WEBサイトが初めて公開されたのは1991年。翌年の国際会議に出席したKEKの研究者がWWWに興味を持ち、CERNの開発者に直接ウェブページの作成法を教えてもらい、日本で初めてKEKがウェブサイトを公開しました(図7)。WWWサーバーに用いたパソコンが、KEKで展示されています。CERNは現在のウェブの経済価値は年間1.5兆ユーロ(1ユーロ130円換算、年間195兆円)と試算しています。桁外れのイノベーションです。

CERNのLHC実験で生成される実験データの量は、年間50ペタ(10¹⁵)バイトです。この膨大なデータ量に対応するため、各大学や研究所にある数千のコンピュー

タを接続し、あたかもひとつのコンピュータであるかのように利用する技術、GRIDが開発されました(図8)。これは、今日のクラウドコンピューティングと呼ばれるグローバル・ネットワークの先駆けとなりました。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ます。

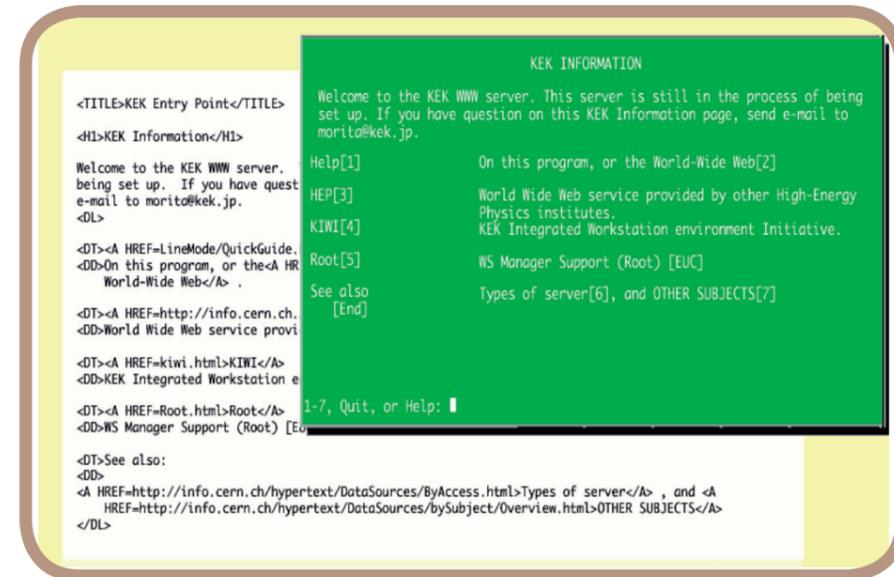


図7 / 日本初のウェブページの再現ページ

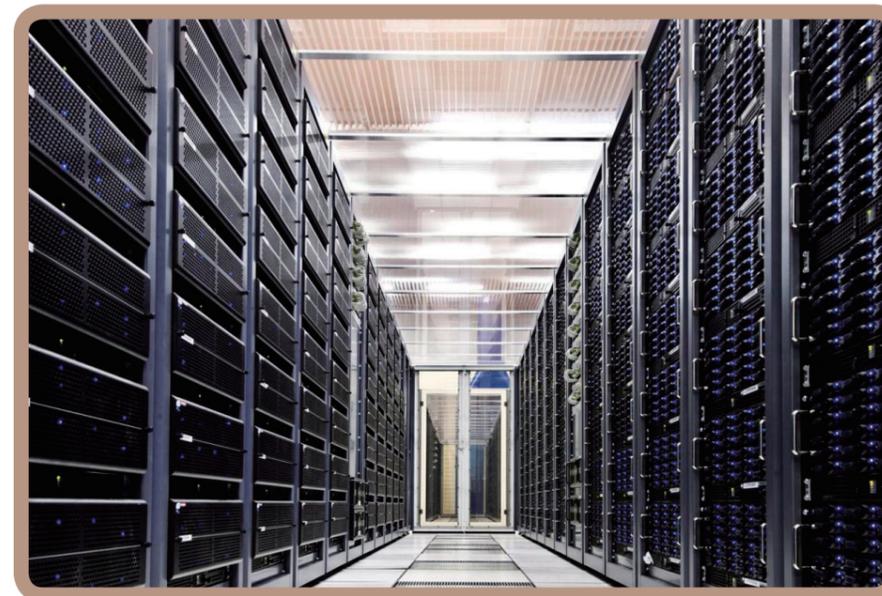


図8 / LHC用のGRIDコンピューターサーバー画像提供:CERN

加速器と医療

日本国内だけでも1000台以上、世界では1万台に近い加速器が、診断や治療に活躍しています。電子や陽子、さらに重いイオンの粒子を加速すると、物質を電離させる放射線が発生します。この放射線をうまくコントロールすることで、人体の内部の構造や機能を傷つけることなく検査したり、がんなどを治療をしたりできるのです。

加速器を使う代表的な診断装置がコンピュータ断層撮影 (CT) です (図9)。X線発生装置を身体の外側に回転させ、反対側にある放射線検出器で電気信号情報をコンピュータで計算して横断面を画像にします。CTは身体を輪切りに撮影して、脳出血や脳こうそく、がん等の診断に使われます。最近ではCTの高速、高性能化が実現し、脳や心臓、肝臓などの臓器を連続的に撮影し、血流循環動態をとらえることも可能となっています。

がんの早期発見が可能な陽電子放射断層撮影 (PET) で使用される薬剤の製造にも、加速器が使用されています。加速器を使った放射線治療は、副作用が小さく患者に優しいがんの治療法として注目されています。

KEKは陽子を使う粒子線治療に深く関わっています (図10)。1973年に大型陽子加速器を利用した治療を提案し、放射線医学総合研究所、筑波大学との共同研究により実験を開始しました。1983年には臨床研究を開始。2000年まではKEKで、翌年からは筑波大学附属病院に新しく設置された施設で治療を行い、これまで約4000名が粒子線治療を受けました。

さらに、難治がんの治療法として、ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) が注目されています (図11)。BNCTはがん細胞に選択的に集まるホウ素化合物を治療直前に患者に投与し、病巣部に中性子を照射することによってがん細胞内のホウ素と中性子が核分裂反応を起こし、放出される粒子ががん細胞を選択的に破壊する治療法です。これまでは研究用原子炉を使ってBNCTの臨床研究が行われてきました。現在、小型の加速器を使って中性子を発生させて治療をするBNCTの実用に向けた研究開発が進められています。2010年に筑波大学を中心にKEK、日

本原子力開発機構 (JAEA)、北海道大学、茨城県と三菱重工業等の民間企業の産学官連携プロジェクトチームが発足し、治療装置の開発に着手しました。線形加速器 (リニアック) を用い、陽子を8メガ電子ボルト (MeV) まで加速してベリリウムに入射し、中性子を発生させます。リニアックはKEKが中心となりJ-PARCの技術を活用して開発しました。製造はJ-PARC加速器の製造実績がある三菱重工業が担当しています。装置は茨城県が整備したいばらき中性子医療センター (茨城県那珂郡東海村) に設置され、J-PARCの協力のもと試験が行われています。内閣府が主導する「つくば国際戦略総合特区」のライフイノベーション分野のプロジェクトの一つに設定されています。

加速器は、創薬にも使われます。タミフルやリレンザといった著名なインフルエンザ薬をはじめ、薬の標的となるタンパク質の立体構造 (三次元構造) を基に設計された薬が急速に普及しています。標的タンパク質と薬の関係は、鍵穴と鍵にたとえられます。有用な薬を作るためには、鍵穴 (標的タンパク質) に正しくフィットする鍵 (薬) を作る必要があります。そこで、鍵穴の立体構造を加速器から発生する「放射光」で解析し、鍵の形を分子レベルで設計します。また、放射光を用いて、標的タンパク質が薬と設計通りに結合しているか明らかにします。その結果、従来よりも効果が高く、かつ副作用が少ない薬を短期間・低コストで作れるようになりました。国内のいくつかの製薬企業は、KEKの放射光施設フォトンファクトリーを利用して、新薬の開発を行っています。



図9 / CTスキャン装置
画像提供 株式会社日立製作所ヘルスケアビジネスユニット



図10 / 粒子線治療装置

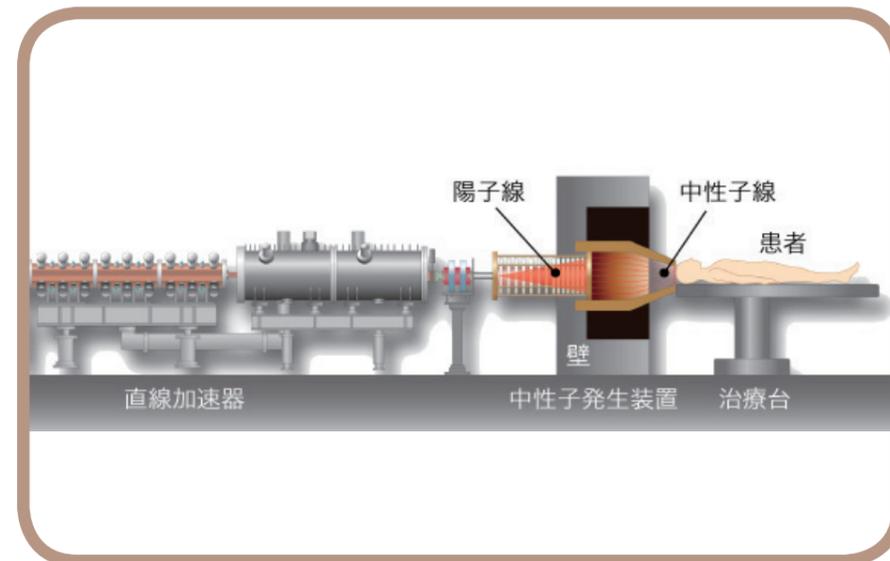


図11 / リニアックベース BNCT 用治療器

加速器と材料

加速器で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ます。

加速器と工業技術の深い関係を示す良い例が「自動車」です(図12)。自動車は約3万点の部品で構成されます。鉄鋼、非鉄金属、ゴム、プラスチック、紙などの材料が用いられて、開発・生産過程で加速器が活用されています。

例えば、タイヤの製造には電子加速器が使われます。原材料の生ゴムに放射線を照射すると強度が増します。精度の高い成形を行うことも可能となり、タイヤの品質・安全性が向上し、ゴムの使用量の削減にも役立ちます。

例としてJ-PARCの中性子ビームライン、SPring-8の放射光ビームラインとスーパーコンピュータ京を用いた新材料開発技術が挙げられます。加速器を用いたゴム内部の構造と運動性の詳細解析とコンピュータシミュレーションを行い、タイヤの相反

性能である低燃費性能、グリップ性能に加え耐摩耗性能の大幅な向上が可能となる新材料開発技術を完成しました。

従来の技術では困難であったゴムの構造と運動性の関係の解明が、放射光(X線)と中性子を使い分けることで可能になりました。解明したモデルによるコンピュータシミュレーションで分子構造を設計し、高性能なタイヤの製造を可能にしました。

自動車に使われているそのほかの加速器関連技術も図Xに紹介します。

エンジンルームの中のさまざまな耐熱性電線の製造にも電子加速器が使われています。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、放射線照射で溶剤や熱に強くなり、電気絶縁性・耐薬品性が増します。このため、エンジンルームのような高温環境でも、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を実現しています

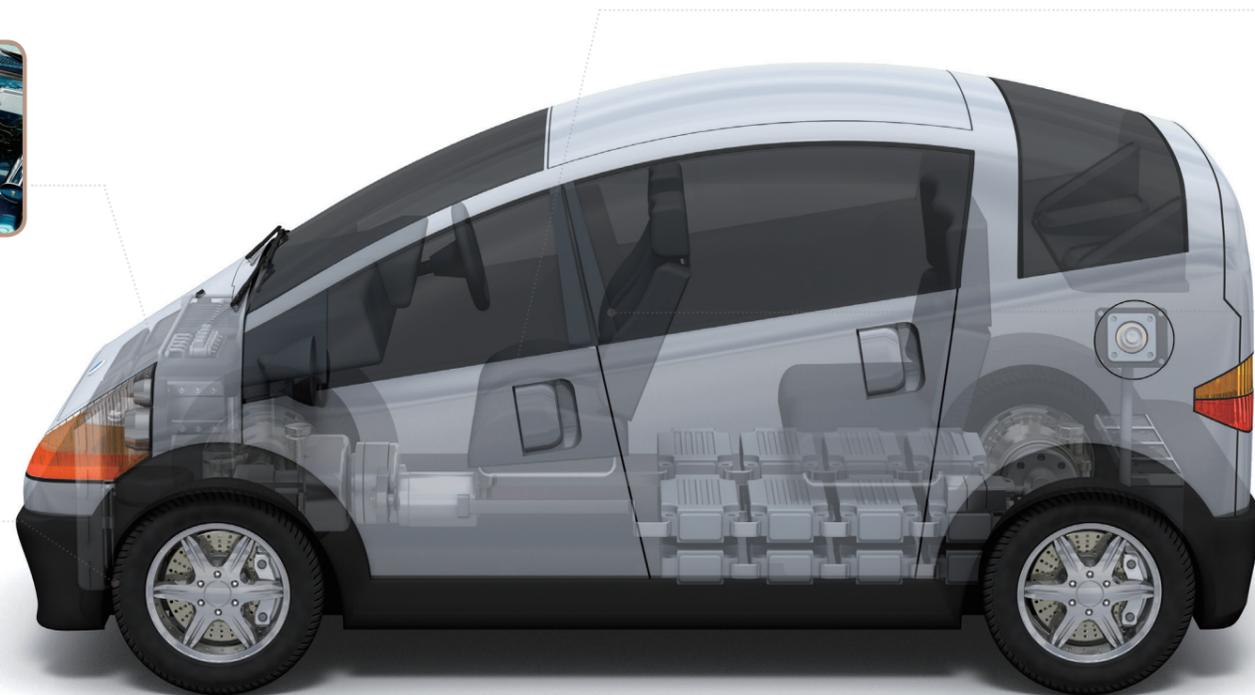
エンジンルーム



タイヤ



日本国内では、年間約2億本のタイヤが製造されており、その90%以上が「ラジアルタイヤ」です。そのラジアルタイヤの90%以上が電子加速器を使って製造されています。



電子制御装置



自動車には、燃料インジェクターの制御や、エアコンのインバーターなどさまざまな電子制御装置が使われます。これらの装置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することによって、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ます。また、電子線照射は、素材の強化にも役立っています。

内装



自動車のインストルメントパネルやドア、シートなどのプラスチック製内装部品の多くは製造過程で放射線が照射されています。ドアやシートの緩衝材、エアコンの断熱材などには「発泡プラスチック」が使われています。型に入れたプラスチック基材の外から放射線を当てて外形を固め、加熱処理で内部に発泡を作ります。車両の軽量化や、燃費の向上に役立っています

図12 / 自動車に使われる加速器関連技術

自動車イラスト: Rey, Hori

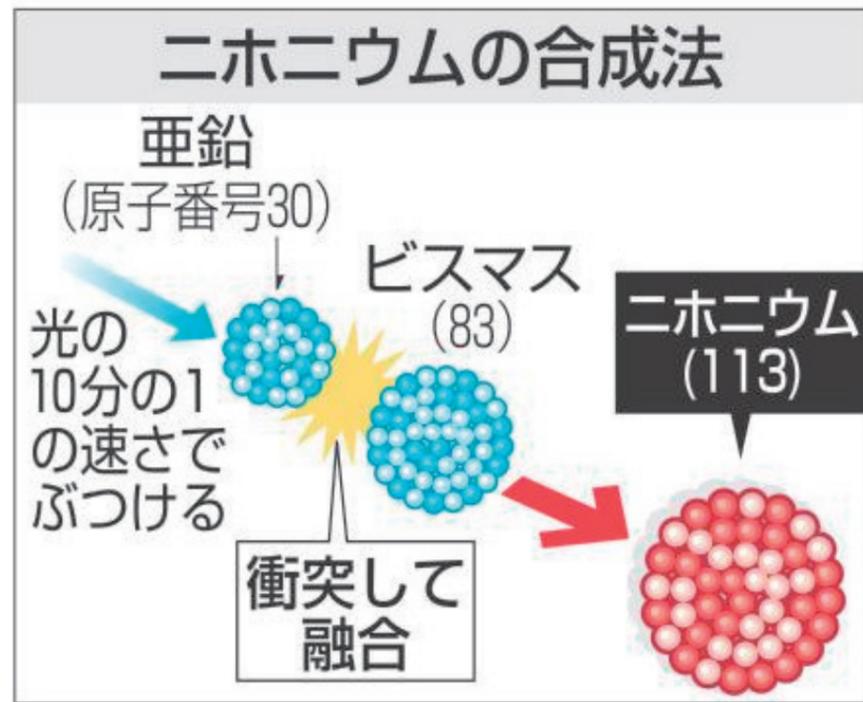


図13 / ニホニウムの合成 画像提供:理化学研究所ホームページ

ニホニウムの発見

113番目の元素を理化学研究所の研究グループが発見、2015年末に命名権が与えられました。名称はニホニウム(Nh)。新元素の合成には加速器が使われています。理化学研究所の重イオン線形加速器RILACを用いて、亜鉛(Zn:原子番号30)のビームをビスマス(Bi:原子番号83)標的に照射し、ビーム核と標的核との完全融合反応によって合成されました(図13)。

原子番号が104以上の超重元素と呼ばれる元素は全て不安定で、より安定な元素へと短時間で崩壊してしまいます。そのため新元素の合成を証明するには、その元素が崩壊連鎖を起こして既知の原子核へ到達していることの確認が重要です。標的から飛び出した粒子は反跳分離器と呼ばれる分離装置を通過させた後、検出装置に導入して調べます。加速器、検出器の性能向上と粘り強い実験が今回の発見に繋がりました。

2004年に、1秒間に2.4兆個の亜鉛ビームをビスマスに79日照射し、約50兆回衝突させた結果、1個目の合成に成功しました。これまでに3回の合成に成功しました。同研究グループは、すでに、次なる119番元素を合成するために、加速器のビーム強度増強や分離器の性能向上を図っているそうです。元素周期表にアジアの国としては初めて日本の元素が加わりました。加速器ベースの材料開発の新たな進展が期待されます。

加速器と農業

おいしさ、安全性、価格… 様々なものが農作物に求められます。農業分野のこれらの問題解決にも、加速器は一役かっています。

おいしい農作物をつくるために欠かせない品種改良にも加速器が使われています。重粒子線ビームを植物に当てると、細胞内のDNAがダメージを受けます。細胞はダメージを自己修復しようと動き出しますが、その際、植物に突然変異が起こることがあります。このことを利用して、植物の色や形、性質を変化させることができるのです。

加速器を使うと2~3年で品種改良を行うことができます。これは、5~10年の期間を要する交配を繰り返し行う方法より効率的です。どんな品種になるか予想できないという課題もありますが、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ます(図14)。

農薬を使わない害虫駆除法として「不妊虫放飼法」があります。人工的に不妊化したオスの害虫を大量に野外に放ち、自然繁殖を防ぐ方法です。害虫の不妊化には、加速器でつくった放射線が使用されます。日本では1970年代より行われ、沖縄を中心にゴーヤやキュウリ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し、日本全国にゴーヤが出荷できるようになりました。

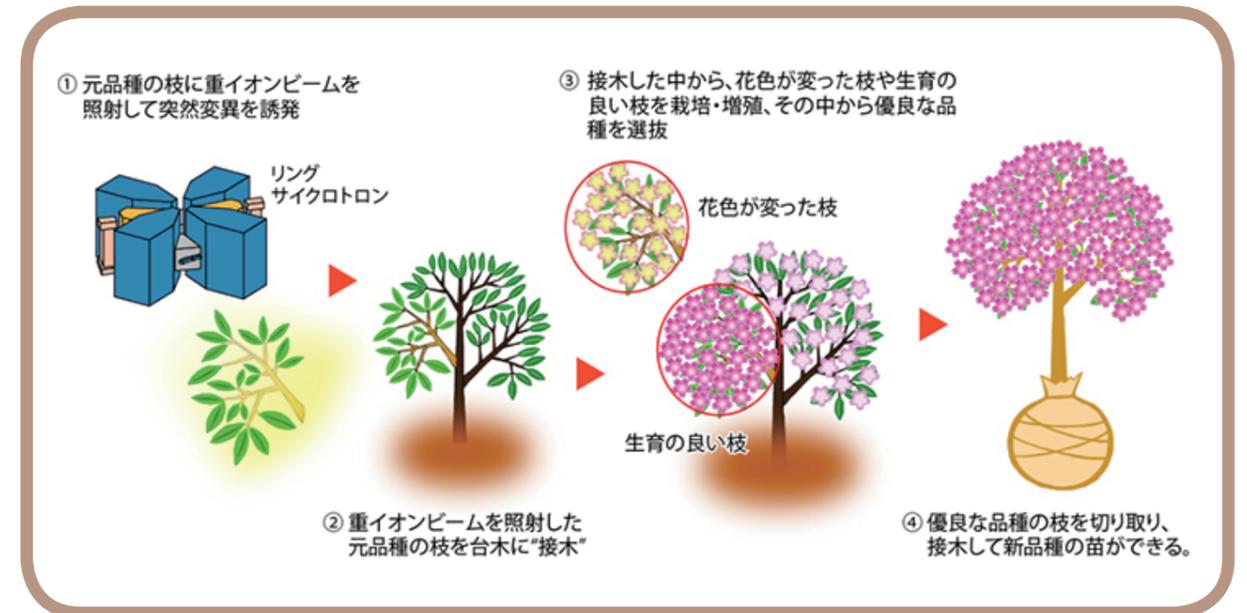


図14 / 加速器による品種改良 画像提供:理化学研究所

加速器と環境・エネルギー

環境汚染を防ぐ-加速器にはそんな役割も期待されています。また、将来のエネルギー対策に加速器を役立てる研究も進められています。

火力発電所では、酸性雨の原因となるイオウ酸化物や窒素酸化物が多く排出され、環境への悪影響が世界的な問題となっています。近年、小型の加速器が作り出した電子線を排ガスに照射することで、大気汚染物質を効率よく除去する技術が開発されました(図15)。この技術は、火力発電に依存する中国の成都や杭州、ポーランドのポモジャーニの火力発電所で実用化されています。

100万キロワット級の原子力発電所からは毎年約20トンの使用済燃料が発生、その処理処分は原子力開発を進める上で重要な課題です。廃棄物処分の大幅な負担軽減を目指し、半減期が数万年に及ぶ長寿命の高レベル放射性廃棄物を核変換して、半減期が数百年の核種へと短寿命化する「加速器駆動核変換技術」が研究開発されています。ここで用いられるのが加速器駆動未臨界炉(ADS)です。ADSの研究はJ-PARCでも行われています。

ADSは主に大強度陽子加速器と未臨界炉の2つで構成されます。大強度陽子加速器で核破砕反応に必要なエネルギー(数百メガ電子ボルト~数ギガ電子ボルト)まで陽子を加速し鉛・ビスマスといった液体金属などのターゲットに衝突させることで中性子を発生させて、ネプツ

ニウム、アメリシウム、キュリウム等の高レベル放射性廃棄物を燃料とする未臨界炉に導き、これらの長寿命核種を短寿命核種へと核変換します(図16)。ADSは、炉心が未臨界であるため原理的に暴走事故は起こらず、停止させれば炉も停止するため、安全性が高いのです。深地層に最終処分する高レベル放射性廃棄物の量を減らし、地層処分が必要な超長期の隔離期間を大きく短縮することができます。

エネルギー問題・地球環境問題を解消するため、太陽エネルギーを人類が用いることのできるエネルギーに変換する「人工光合成」の研究が進められています。2012年に東京工業大学、KEKなどの研究グループは、人工的に作られた分子が光エネルギーを分子内に蓄える際の構造変化を、加速器からの放射光で観察し、人工光合成システムを直接的に初めて解明しました。本分子は、光合成を制御する天然の分子より長時間、吸収した光エネルギーを保持できることから、今後さらに効率的な人工光合成システム開発の進展が期待されます。

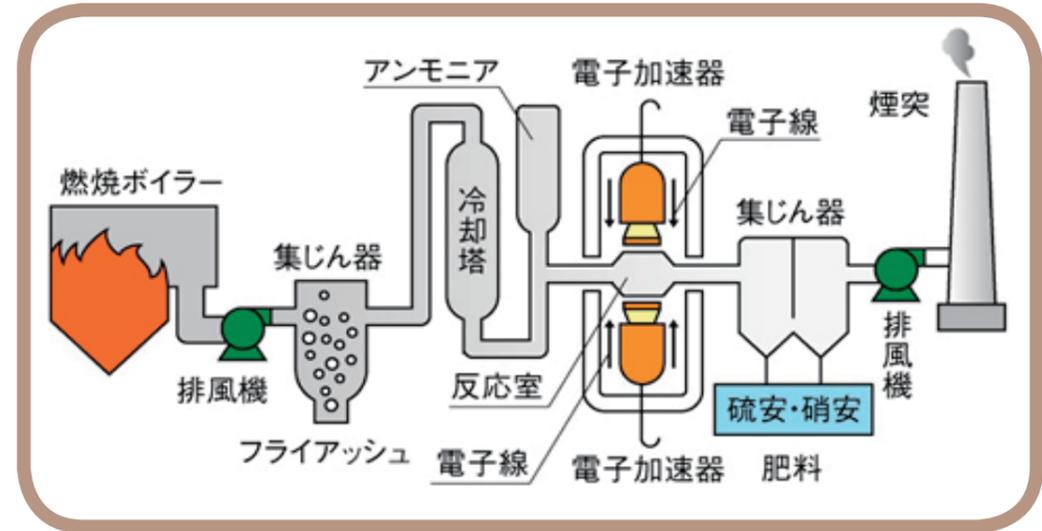


図15 / 加速器による排ガス処理技術 提供:日本原子力開発機構

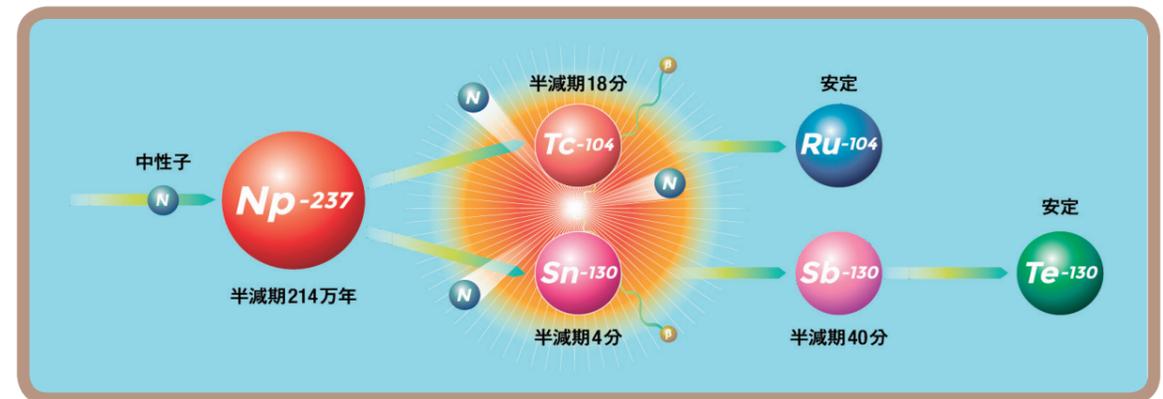


図16 / 高レベル放射性廃棄物の処分に役立つ核変換の原理

加速器と安全

鉄道、橋梁、発電所、プラント等の大型構造物の安全性が容易に確認できれば、各種設備を長期にわたって使用することが可能になり、自然環境の破壊を防ぐことにもつながります。このような安全性確認を行う検査方として、物を壊さずに内部の傷や劣化状況を調べる非破壊検査が注目されています。小型直線加速器でつくった高エネルギーX線や中性子線を対象物に照射することにより、目視では確認できない内部の

傷や劣化を見つけ出すことが出来ます。また、この検査方法を活用して、空港での手荷物検査や貨物のセキュリティチェックも行われています。現在、理化学研究所では、加速器小型中性子源システムによるインフラ非破壊観察技術開発が推進されており、装置の小型可搬化開発が進められています（図17）

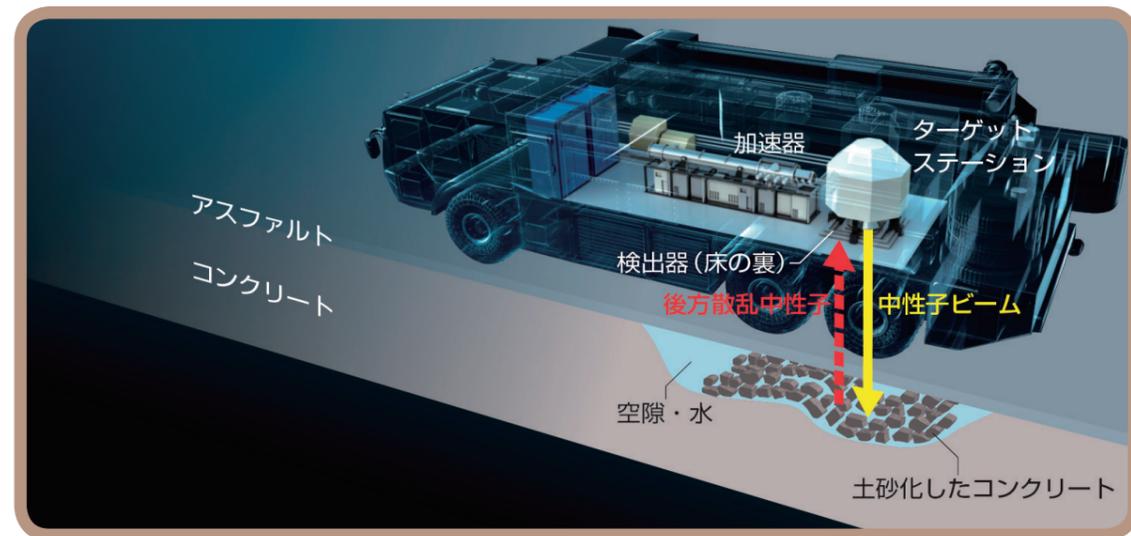


図17 / 中性子を用いた非破壊検査
画像提供: 理化学研究所

加速器と歴史

加速器は、遺跡や仏像の年代測定にも用いられます。年代は、試料に含まれる放射性同位体の量から測定しますが、この放射性同位体のイオンを測定可能な種類に変える仕組みとして、加速器が用いられています。

埋蔵文化財を傷つけることなく検査するためにも加速器が使われます。一般的なレントゲン撮影(X線透視技術)のほか、中性子イメージングを使うと、相補的な情報を得ることが可能です。例えば、金属の腐食

部分は、金属の密度が減少しているためX線が透過し易くなるのに対し、そこに水素を含む腐食生成物が発生していると中性子は透過し難くなります。金属容器内に存在する紙、布、植物等の有機物は中性子ラジオグラフィではっきりと確認できます(図18)。



図18 / 14~15世紀の西チベットの仏像
右側の画像は中性子イメージングで仏像の内容を調べたもの。台座部分の空洞に植物が隠れているのがわかる
画像提供: Paul Scherrer Institute / Neutron Imaging and Activation Group

ILC準備において すでに現れている波及効果

KEKはILC計画実現に向けた加速器技術開発のため、先端加速器試験施設（ATF）、超伝導リニアック試験施設（STF）、空洞製造技術開発施設（CFF）を設置しました。ここで行われている取組から、ILC実現により期待される波及効果がすでに出ています。これらの具体的な例をいくつか紹介します。

先端加速器試験施設（ATF）

ATFは2000年に設置されました。1.3GeVのリニアック、周長約140メートルのダンピングリングを備えています(図19)。将来の加速器に必要なビーム計測技術とビーム制御技術の開発研究を行っています。2008年にはダンピングリング下流に約100メートルのATF2ビームラインを建設し、ILCで高ルミノシティを実現するために必要なナノビームの技術開発を行いました。

計画当初からアジア、ヨーロッパ、アメリカの3地域が同程度の貢献をすることを旨として設計製造および建設を分担しました。電磁石システムやビームモニターなど多岐にわたる加速器要素を世界中の大学・研究機関が分担しました。中国、韓国、フランス、イギリス、米国、国際機関CERNなどが参加しています。

ビーム運転に関しても、ビームラインの建設と同様に世界各国の研究者が参加し、ILC最終収束系の技術開発に興味を持つ世界中の研究者が参加しています。現在は、ダンピングリングで生成される超低エミッタンスビームを利用して、37ナノメートルのビームサイズの実現とナノメー

トルレベルでのビーム衝突位置制御を目標として研究を進めています。2014年には44ナノメートルの世界最小ビームサイズを達成し、ILCの目標ビームサイズまであと一歩です。

KEKがホストとして進めているATF2での経験は、ILCを実現する際の国際的協力分担体制のモデルになります。共同開発研究に訪れる来訪者は年間3000人日を超え、半数以上は海外からの来訪者が占めます。またATFに関連した研究により博士号を取得した人は1990～2015年に58名で、そのうち海外から28名、総研大は11名（内4名は留学生）です。博士号取得後の進路は4分の3以上が加速器科学に関連するアカデミアで活躍しています。2章で述べた「人材育成への波及効果」がすでに現れていることを理解いただけたと思います。



図19 / ATFのダンピングリング

超伝導リニアック試験施設(STF)

STFは2005年に設置されました。電解研磨設備、クリーンルーム設備、クライオモジュール組立設備、超伝導空洞検査設備、超伝導空洞縦測定設備、入力カップラプロセス設備、クライストロン設備、ヘリウム冷凍機設備などを備えています。地下10メートルには横幅5メートル、高さ5メートル、長さ100メートルの加速器トンネルがあり、試験用超伝導加速器のビーム運転が可能です。ILC用の加速モジュール、ヘリウム冷凍機システム、高周波システムの開発を念頭に置き、各種の超伝導加速システムの開発に供用できる設備を集中的に整備。その機能をKEK内や国内外の大学、研究所に供用し、超伝導加速器の発展に大きな貢献をしています。

2010年には「S1グローバル・クライオモジュール試験」が行われました(図20)。ILCの加速勾配に近い高性能空洞を世界から持ち寄り1台のクライオモジュールで同時に運転する国際協力試験をKEKがホストしました。4台の空洞を組み込む

ことのできる半サイズのILC型クライオモジュール2台にKEKの空洞4台、ドイツ電子シンクロトロン研究所(DESY)の空洞と米フェルミ国立加速器研究所(FNAL)の空洞2台を装着して、同時に運転しました。2台のクライオモジュールのうち1台はイタリア国立核物理研究所(INFN)が、もう1台はKEKが製造しました。トラブルのため合成運転は1台を外した空洞7台で行われ、平均加速勾配は26MV/mでした。各国の研究者と協力して組立、試験を遂行できたのは大きな成果といえます。

現在はSTFフェーズ2計画が実施されています。12台の空洞をILC用のクライオモジュールの1.5倍長のクライオモジュールに収めてビーム加速試験を行います。この内9台の空洞は単体試験で35MV/m以上に到達する非常に良い結果となりました。これまでに3回の冷却試験を行い、クライオモジュールとしての平均加速勾配31MV/mを得ました。



図20 / S1グローバル実験の様子

空洞製造技術開発施設(CFF)

CFFは2011年に設置されました。クラス100000のクリーンルームに、大型の電子ビーム溶接機、プレス機、化学処理室などが設置されています。従来からある機械工学センターの工作機械と合わせると、ニオブ製超伝導空洞をKEK内で全て製造できます。超伝導加速空洞の試作は機械工学センターで行っていましたが、ILC計画に向けて製造技術研究を加速するため本施設を設けました。

2017年にはCFFで製造した超伝導加速空洞の加速勾配が、ILCの要求仕様である35MV/mを超える38MV/mを達成しました(図21、22)。ここで得られた知識や技術を広く公開することで、多

くの企業が空洞製造に参入することを期待しています。CFFでは加速空洞の製造品質向上、製造コスト低減に関する研究開発を継続して行っており、現在はニオブ材のコスト低減の研究を行っています。

空洞には高純度のニオブが使われます。ILC計画では大量のニオブ材が必要なので、材料の安定供給のために複数の企業から材料調達するための産学連携が必要です。KEKはそのための新たな取り組みを進めています。



図21/ CFFで製造した超伝導加速空洞

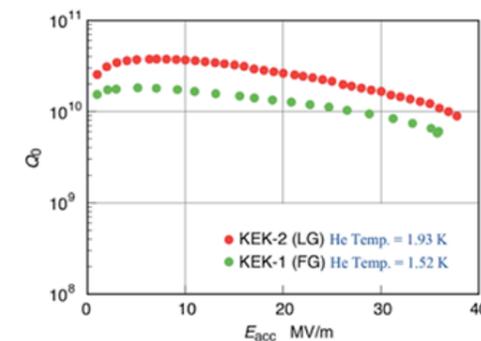


図22/ 電界性能試験(たて測定)結果のグラフ。赤い点が38MV/mを記録した2号機

測定器

ILC測定器として、ILDとSiDという二つのコンセプトが提案されています。多くの日本の研究者が「ILD測定器」の国際研究チームに参加して、ILCの測定器の開発研究を推進しています。この開発研究を通して多くの若手研究者を育成しています。これまでに100人を超える修士号取

得者と10名の博士号取得者を輩出しています。測定器から得られる大量のデータを解析するソフトウェアのシステム(ILCDIRAC)の開発も行われ、そのシステムは他の高エネルギー実験にも応用されています。

波及効果に関するその他の調査

ILCによる波及効果に関する調査は多く行われています。すべて網羅はできてはいませんが、収集した資料を参考文献に挙げます[参考文献10, 61-68]。ここでは、いくつかの報告について紹介します。

2007年にはKEKのILC技術波及効果調査グループにより「ILC技術の波及効果」が発表されました。ILC技術をシステム／サブシステムの面から、次いで基盤技術の面から波及効果を概観しています。これらの中から、未だ潜在的であると思われる技術を選び、詳細に調査しています。学界および産業界への直接ヒアリングも行っています。具体的には、フォトカソード電子銃、レーザーコンプトン散乱線源および偏極電子ビームを取り上げています。

2013年には先端加速器科学技術推進協議会(AAA)の大型プロジェクト研究部会産官学連携推進ワーキンググループから「加速器利活用の現状と将来—国際リニアコライダーの生み出す未来と波及効果—」が発表されました。延べ49団体、300名が参画し、議論を交わしてまとめました。産業への波及効果、関連技術の利用について幅広く調査されています。ILC誘致に伴う社会的、経済的、技術的波及効果について言及しています。

最近では、2015年に文部科学省が行った「国際リニアコライダー(ILC)計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析」(野村総合研究所)の報告書が公開されました(10)。加速器、素粒子・原子核物理学、経済分析等の分野の研究者や有識者による、国際リニアコライダー計画に関する調査分析検討委員会(委員長:熊谷教孝高輝度光科学研究センター名誉フェロー、他委員10名)が設置され、調査・分析結果や報告書の内容について検討されました。国内外の政府機関、主要研究機関、加速器関連企業への現地訪問インタビュー調査も実施されました。報告書前半の約

140ページに渡り、技術的、経済的波及効果が検討されています。TDRに示された数字を前提にILCの建設及び活動による経済波及効果を推計した結果、ILC計画により発生する国内の最終需要額は約2兆1000億円、生産誘発額は約4兆4600億円であるとされました。また、インタビュー結果を基に、ILCで開発された技術の有効利用が見込まれる産業分野・製品分野がまとめられました。日本生産性本部などが経済効果額を試算しています。ILCを誘致している自治体は、ILCの誘致による街づくりの波及や地元経済への波及という観点で精力的にビジョン作成や試算を行っています。

波及効果を考察するうえで参考となる調査資料は海外にも多く存在します。たとえば米国エネルギー省(DOE)は2010年に「Accelerators for America's future」を発行し、その後も継続して加速器科学がエネルギー、環境、医療、安全等に及ぼす波及効果に関する報告書を作成しています。

CERNは2013年に「科学とイノベーションを加速する欧州の素粒子物理学研究の社会的恩恵」をまとめました。原文は英語ですが、日本語訳もあります。欧州の各国が基礎科学の知識をプールした結果に生じる社会的な利益を考察しています。

経済協力開発機構(OECD)は、「大型研究施設の経済・社会的波及効果:CERNケーススタディ」を報告しています(71)。これも原文は英語ですが、日本語訳もあります。調査は、科学研究に関する事項につき、OECD加盟国及びパートナー国の上級科学政策担当者が協議を行う場であるグローバル・サイエンス・フォーラム(GSF)が行っています。この報告書の目的は、新規の研究施設やプロジェクトの実施にかかる、難しい意思決定を行う立場となる行政官、資金提供団体、政策決定者等に資する有益な教訓や実践を抽出することであると記されています。

参考文献

- [1] 幅 淳二, Bell測定器:20世紀最後のコライダー検出器, 高エネルギーニュース, 30 (3), 170-174, 2011
<http://www.jahep.org/hepnews/2011/11CBelleHaba-02final.pdf>
- [2] 山内 正則, Bファクトリーによる小林・益川理論の証明, 加速器, 6 (1), 35-40, 2009
- [3] 巨大加速器実験、日米の闘い, 日経サイエンス, 2009年3月号, 92-107, 2009
- [4] 高エネルギー加速器研究機構, SuperKEKB加速器, 2014
http://www.kek.jp/ja/PublicRelations/DigitalLibrary/Pamphlet/20130522_superkek.pdf
- [5] CERN プレスリリース, CERN experiments observe particle consistent with long-sought Higgs boson, 2012
<http://press.cern.ch/press-releases/2012/07/cern-experiments-observe-particle-consistent-long-sought-higgs-boson>
- [6] 特集 ヒッグス粒子:最強加速器で発見, 日経サイエンス, 2012年9月号, 30-43, 2012
- [7] 高エネルギー加速器研究機構, 高エネルギー加速器研究機構 要覧2017, 2017
http://www.kek.jp/ja/PublicRelations/DigitalLibrary/2017_youran.pdf
- [8] 総合研究大学院大学, 総合研究大学院大学 要覧2016-2017, 2016
http://www.soken.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/2013/12/j_youran2016.pdf
- [9] 内閣府原子力委員会 ホームページ, KEK加速器の産業波及効果, 大強度陽子加速器施設計画評価専門部会(第3回), 2000
<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/daikyo/siryo/siryo03/dai-si03.htm>
- [10] 文部科学省 ホームページ, 国際リニアコライダー(ILC)計画に関する技術的・経済的波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野における技術面を含む研究動向に関する調査分析, 2015
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1357655.htm
- [11] 特集2 粒子加速器に関する日立システム技術, 日立評論, 1997年2月号, 1997
<http://www.hitachihoron.com/jp/archive/1990s/1997/02.html>
- [12] 株式会社 東芝 ホームページ, 東芝の技術がヒッグス粒子の発見に貢献,
https://www.toshiba.co.jp/special/higgs/index_j.htm
- [13] 世界最大の発見を支えるキーハード, IHI技報, 53(3), 28-29,2013
- [14] 巨大な精密装置「加速器」, 三菱重工グラフ, 169, 2-9, 2012 http://www.mhi.co.jp/discover/graph/pdf/169_01.pdf
- [15] 三菱重工の常伝導/超伝導加速空洞—最先端加速器システムの開発に貢献—, 三菱重工技報, 53 (1), 32-34, 2016
<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/531/531032.pdf>
- [16] 大久保 光一, 熊谷賞 超伝導高周波空洞応用に関する加速器科学への開拓的貢献, FASだより, 8, 16-20, 2014
<http://www.heas.jp/lecture/fas/fas2014.5%20no.8.pdf>
- [17] 最先端研究を支える粒子加速器と加速器技術を応用した高精度放射線治療装置, 三菱重工技報, 51 (3), 84-87, 2014
<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/513/513084.pdf>
- [18] 米澤 宏, 三宅 節雄, 大久保 良久, 100MW パルスクライストロン, 加速器2 (1), 63-70, 2005
- [19] 岡本 正, 大電力CWおよびパルスクライストロンの開発と製造, 第11回日本加速器学会年会プロシーディングス, 155-159, 2014
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUOL/SUOLA2.pdf
- [20] 国立科学博物館 産業技術史資料情報センター ホームページ, 重要科学技術史資料 第00143号「508.6 MHz, 1.2 MW 連続波クライストロン(E3732, T62)—世界—安定で高出力の連続波クライストロン—」
<http://sts.kahaku.go.jp/material/2014pdf/no143.pdf>
- [21] 萩津 透, 榎田 康博, J-PARCニュートリノビームライン用超伝導磁石システムの開発, 高エネルギーニュース, 28 (2), 2009
<http://www.jahep.org/hepnews/2009/Vol28No2-2009.7.8.9OgitsuMakida.pdf>
- [22] 萩津 透 他21名, J-PARCニュートリノビームライン超伝導磁石システム, 小島・平林記念 機械工学・超伝導低温シンポジウム 第10回高エネ研メカ・ワークショップ, 2009
<http://www-mec.kek.jp/open/report/MechWork/2009/Proc-pdf/CM09-01Ogitsu.pdf>
- [23] 有本 靖 他12名, SuperKEKB ビーム衝突点用超伝導4極電磁石システムの開発, 第11回日本加速器学会年会プロシーディングス, 132-136, 2014
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUOM/SUOM04.pdf
- [24] 鉱物資源マテリアルフロー2016, 18. ニオブ, 2016
http://mric.jogmec.go.jp/public/report/2017-01/18_201701_Nb.pdf
- [25] 梅澤 裕明, 超伝導加速器用ニオブの工業的生産, 第44回加速器科学研究会, 66-80, 2007
- [26] 横山 将志, 魚住 聖, Multi Pixel Photon Counterの研究開発, 高エネルギーニュース26(3), 2007
<http://www.jahep.org/hepnews/2007/Vol26No3-2007.10.11.12yokoyamaozumi.pdf>
- [27] 山下 貴司, 脳研究用次世代PET装置の開発, Isotope News, 2014年4月号, 720, 18-20, 2014
https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201404_RIYOGIJYUTU_YAMASHITA.pdf
- [28] 日本アイソトープ協会, 放射線利用統計2015 <http://www.jrias.or.jp/report/cat/101.html>
- [29] 秋山 浩, 陽子線治療, 高エネルギー加速器セミナー OHO'12テキスト, 2012
<http://accwww2.kek.jp/oho/OHOtxt/OHO-2012/6%20akiyama%20hitachi%2020120821.pdf>
- [30] 熊田博明, 小型加速器ベースの中性子捕捉療法用治療装置の開発, 産学官連携ジャーナル, 9 (4), 17-20, 2013
https://sangakukan.jp/journal/journal_contents/2013/04/articles/1304-03/1304-03_article.html
- [31] 吉岡正和, 熊田博昭, 加速器ベース・ホウ素中性子捕捉療法, 第12回日本加速器学会プロシーディングス, 206-209, 2015
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FROL/FROL09.pdf
- [32] 西島 和三, 創薬にかかわる加速器利用, 加速器, 12 (4), 193-196, 2015
- [33] 畠 忠, タンパク質X線構造解析の創薬への応用, 放射光, 16 (1), 23-29, 2003
<http://www.jssrr.jp/journal/pdf/16/p023.pdf>
- [34] 高エネルギー加速器研究機構 プレスリリース, KEKとアステラス製薬、「顧みられない熱帯病」治療のための創薬共同研究開始, 2012 <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20120920140000/>
- [35] Brian Owens, Happy birthday, WWW, Nature news blog, 2011
http://blogs.nature.com/news/2011/08/happy_birthday_www.html
- [36] 高エネルギー加速器研究機構 ハイライト, 日本初のホームページの礎はKEKから, 2016
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Highlights/20160930151200/>
- [37] CERN Worldwide LHC Computing Gridホームページ <http://wlcg-public.web.cern.ch/about>
- [38] 柏木正之, 星康久, 電子線照射装置の技術とその利用, SEIテクニカルレビュー, 181, 50-57, 2012
<http://www.sei.co.jp/technology/tr/bn181/pdf/sei10723.pdf>
- [39] 高エネルギー加速器研究機構 プレスリリース, SPring-8・J-PARC・スーパーコンピュータ「京」を連携活用させたタイヤ用新材料開発技術「ADVANCED 4D NANO DESIGN」を確立, 2015
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20151112140000/>
- [40] 理化学研究所 プレスリリース, 113番元素の名称・記号が正式決定—元素名「nihonium(ニホニウム)」、元素記号「Nh」—, 2016
http://www.riken.jp/pr/topics/2016/20161130_1/

- [41] 森田 浩介, 新発見の113番元素, 日本物理学会誌, 60 (9), 698-707, 2005
- [42] 大野 豊, 横田 渉, 植物の突然変異と育種, 加速器, 12 (4), 189-192, 2015
- [43] 理化学研究所 プレスリリース, 重イオンビームで四季咲きサクラの品種改良に成功, 2010
http://www.riken.jp/pr/press/2010/20100114_2/
- [44] 理化学研究所 プレスリリース, 重イオンビームを用いてイネの耐塩性変異系統を作成, 2006
http://www.riken.jp/~media/riken/pr/press/2006/20060921_1/20060921_1.pdf
- [45] 小山 重郎, 日本におけるウリミバエの根絶, 日本応用動物昆虫学会誌, 38 (4), 219-229, 1994
http://ci.nii.ac.jp/els/110001124396.pdf?id=ART0001292087&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1477634027&cp=
- [46] 小嶋 拓治, 電子ビームを用いた排煙排水処理技術とその実例, 応用物理, 72 (4), 405-414, 2003
- [47] 青木 慎治, 鈴木 良治, 電子ビーム排ガス処理技術, 電気学会論文誌A, 114 (5), 349-355, 1994
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejfms1990/114/5/114_5_349/_pdf
- [48] 大井川 宏之, 高レベル放射性廃棄物の核変換技術の現状と展望, RADIOISOTOPES, 61 (11), 571-586, 2012
https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/61/11/61_571/_pdf
- [49] 高エネルギー加速器研究機構 プレスリリース, 光合成機能を持つ有機分子が働く瞬間を直接観察, 2012
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20120301140000/>
- [50] 奥木敏行, ATF2ビームラインでの微小ビームサイズの達成, 第12回日本加速器学会年会プロシーディングス, 156-160, 2015
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2015/proceedings/PDF/FROL/FROL01.pdf
- [51] 奥木敏行, ATF2 におけるビーム収束, 高エネルギーニュース, 32 (1), 16-23, 2013
<http://www.jahep.org/hepnews/2013/13-1-4-ATF2.pdf>
- [52] 早野仁司, 超伝導リニアック試験施設棟(STF棟)の現状と今後, 高エネルギーニュース, 32 (2), 101-106, 2013
<http://www.jahep.org/hepnews/2013/13-2-6-STF.pdf>
- [53] 大内徳人 他41名, S1-Global:国際協力によるクライオモジュールの建設, 高エネルギーニュース, 29 (2), 70-78, 2010
<http://www.jahep.org/hepnews/2010/Vol29No2-2010.7.8.9.Oouchi.pdf>
- [54] 山本康史, ILCにむけたSTF Phase-2計画の進展, 高エネルギーニュース, 34 (4), 277-286, 2016
<http://www.jahep.org/hepnews/2015/15-4-4-STF2.pdf>
- [55] Y. Yamamoto et al., Achievement of stable pulsed operation at 31MV/m in the STF-2 cryomodule for the ILC, Proceedings of IPAC2017, 1308-1310, 2017
- [56] 山中 将 他10名, ILC計画実現に向けたKEKにおける超伝導加速空洞の製造研究, 第13回日本加速器学会年会, 2016, in press
- [57] 佐伯 学行, KEK における ILC のための超伝導 9 セル空洞製造の研究, 高エネルギーニュース, 32 (3), 178-184, 2013
<http://www.jahep.org/hepnews/2013/13-3-3-ILCCavity.pdf>
- [58] 高エネルギー加速器研究機構 トピックス, KEK-CFF製超伝導加速空洞2号機, 38MV/mの最大加速電界を達成, 2017
<https://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20170217102500/>
- [59] 株式会社アルバック ホームページ, 超伝導加速器用高純度ニオブ材料の販売を開始
<https://www.ulvac.co.jp/information/20150625/>
- [60] 石川 明正, 小寺 克茂, 末原 大幹, 吉岡 瑞樹, 与那嶺 亮, ILCの検出器, 高エネルギーニュース, 33 (1), 32-39, 2014
<http://www.jahep.org/hepnews/2014/14-1-5-ILCDetector.pdf>
- [61] 文部科学省ホームページ, 国際リニアコライダー(ILC)計画に関する技術的実現可能性及び加速器製作における技術的課題等に関する調査分析, 2016
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/gaiyou/1374357.htm
- [62] 高エネルギー加速器研究機構 ILC技術波及効果調査グループ, ILC技術の波及効果, 2007
- [63] 先端加速器科学技術推進協議会 大型プロジェクト研究部会, 加速器利活用の現状と将来 国際リニアコライダーの生み出す未来と波及効果, 2013
- [64] 日本生産性本部, ILCのイノベーション効果:45兆円, 2013
<http://activity.jpc-net.jp/detail/01.data/activity001376.html#>
- [65] 東北ILC推進協議会 ILCを核とした東北の将来ビジョン策定検討委員会, ILCを核とした東北の将来ビジョン, 2012
<http://www.tohoku-ilc.jp/files/6514/2719/2853/ILC.pdf>
- [66] 東北経済連合会 産業経済グループ, 国際リニアコライダーが日本を変える, 2015
<http://www.tohoku-ilc.jp/files/4814/5446/5092/60dcc04ab2da91f9882fe6b8a9f5ffcd.pdf>
- [67] 佐藤 政宏, ILC誘致に伴う経済波及効果, 岩手経済研究, 2012年11月号, 18-21, 2012
http://www.iwatekeizai.org/wp-content/uploads/research/sp-inquiry_201211.pdf
- [68] 大平 尚, ILCを核とした復興に向けての将来ビジョン, 岩手経済研究, 2012年11月号, 18-21, 2012
http://www.iwatekeizai.org/wp-content/uploads/research/description-ex_201211.pdf
- [69] U.S. Department of Energy, Accelerators for America's Future, 2010
<http://science.energy.gov/~media/hep/pdf/accelerator-rd-stewardship/Report.pdf>
- [70] The European Particle Physics Communication Network for the CERN Council, Accelerating science and innovation Societal benefits of European research in particle physics, 2013
http://cds.cern.ch/record/1551933/files/Strategy_Report_LR.pdf
- [71] OECD GSF, The impact of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society: Case Studies at CERN, 2014
<http://www.oecd.org/sti/sci-tech/CERN-case-studies.pdf>
- [72] TIARA, The impact of accelerators on Society, 2012
<http://www.eu-tiara.eu/Communication/brochureAFS/files/docs/all.pdf>

国際リニアコライダー その展望とKEKの取組み

KEK PROGRESS REPORT 2017-13

© HIGH ENERGY ACCELERATOR RESEARCH ORGANIZATION (KEK), 2018

高エネルギー加速器研究機構
ILC推進準備室
〒305-0801
茨城県つくば市大穂1-1

Email
ilc-cu@ml-post.kek.jp
Tel
029-879-6291