

KEKの将来計画とILC

2018年8月29日

日本学術会議「国際リニアコライダー計画の見直し案に関する検討委員会」

KEK
山内正則

3つの加速器施設で素粒子、原子核、構造物性、構造生物学など幅広い分野の研究を大学と共同で進める大学共同利用機関法人

J-PARC (茨城県東海村)



SuperKEKB (つくば市)



放射光実験施設 (つくば市)



- ◆ JAEAと共同運営
- ◆ 大強度陽子ビーム(3GeV、30GeV)から発生する ν 、 μ 、 K 、 π 、 n などの二次ビームを利用
- ◆ ニュートリノ実験T2Kは世界11か国から500名の研究者が参加
- ◆ 加速器研究者57人、素核研究者63人、物性(生物)研究者47人

- ◆ 電子・陽電子衝突によってB中間子、 τ レプトンを大量生成、標準理論を超えた現象を探る。
- ◆ 国際研究グループBelle IIは世界25か国から800名の研究者が参加
- ◆ H30年度から実験開始
- ◆ 加速器研究者89人、素核研究者29人

- ◆ PFに39本、PF-ARに8本のビームラインを持つ放射光実験施設
- ◆ 年間延べ3000人のユーザー
- ◆ 産業界の利用も促進
- ◆ 老朽化対策が大きな課題
- ◆ 加速器研究者55人、物性(生物)研究者79人

注: 研究者数は常勤教員・技術職員、有期雇用研究員を含む

KEKロードマップ(2018年改訂)におけるILCの記述

3. 5カ年研究戦略(2014-2018)のアップデート

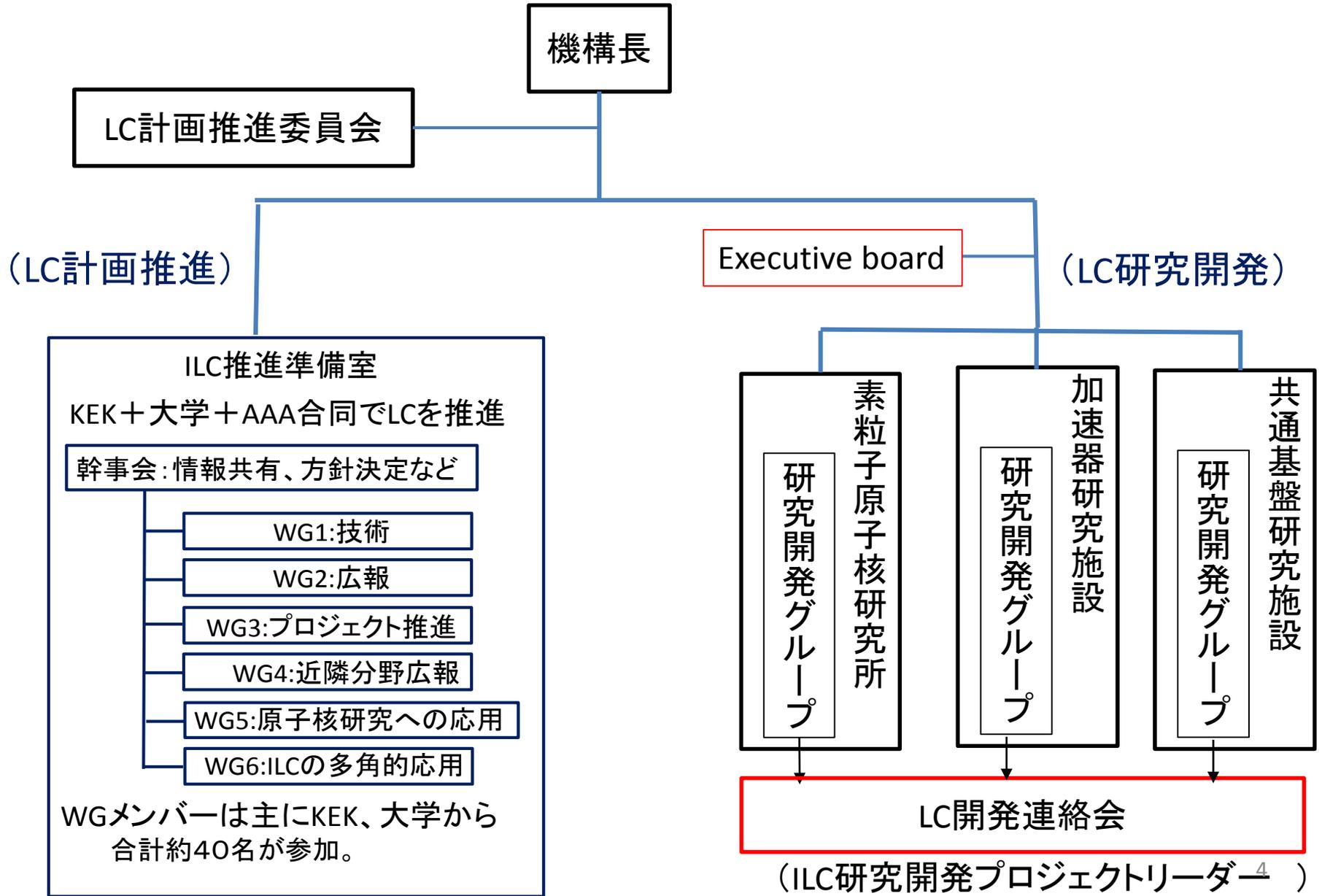
3. 4 ILC

(中略) . . . KEKは、国際将来加速器委員会(ICFA)の下で行われている物理・測定器・加速器の国際的な検討作業に積極的にかかわるとともに、2014年にILC推進準備室を設置、2016年にKEK-ILCアクションプランを策定し、計画を推進している。2017年7月には、高エネルギー物理学研究者会議は、LHC RunIIのこれまでの結果を踏まえ、あらためて、ILCを重心系250GeVのヒッグスファクトリーとして早期に建設することを提案した。2017年11月にICFAは、250GeVのILCの建設を支持する声明を発表した。LHC実験との相乗効果による物理成果を最大限に引き出すべく2030年代初頭のILC稼働を目標とする。KEKが中心となって、日本がホストするILC計画推進のための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の早期着手を目指す。

KEK Project Implementation Plan (2016年6月)におけるILCの記述

The International Linear Collider (ILC) is an accelerator project proposed by the international high-energy physics community. . . . (中略) . . . In addition to R&D, KEK continues to make efforts to promote the ILC project with the Planning Office for the ILC established in February 2014. KEK issued a KEK-ILC action plan in January 2016. In this plan it was proposed that the ILC project proceed in three phases: . . . (中略) . . . At this stage an implementation organization will be set up centering around KEK to prepare for the construction over a period of approximately four years.

KEKにおけるILCの推進体制



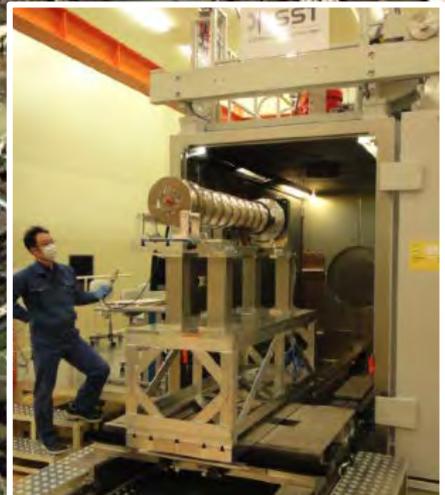
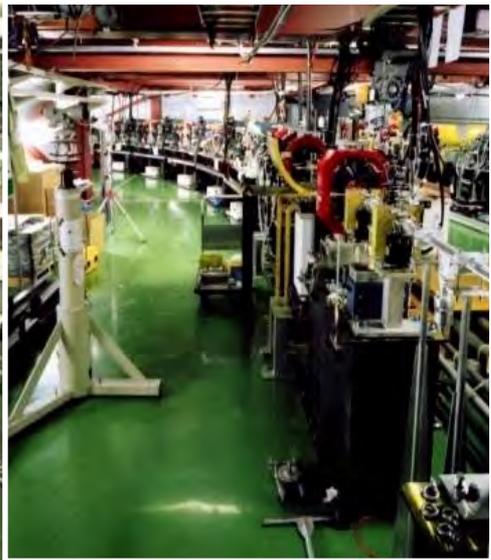
KEKにおける開発研究



ATF

STF

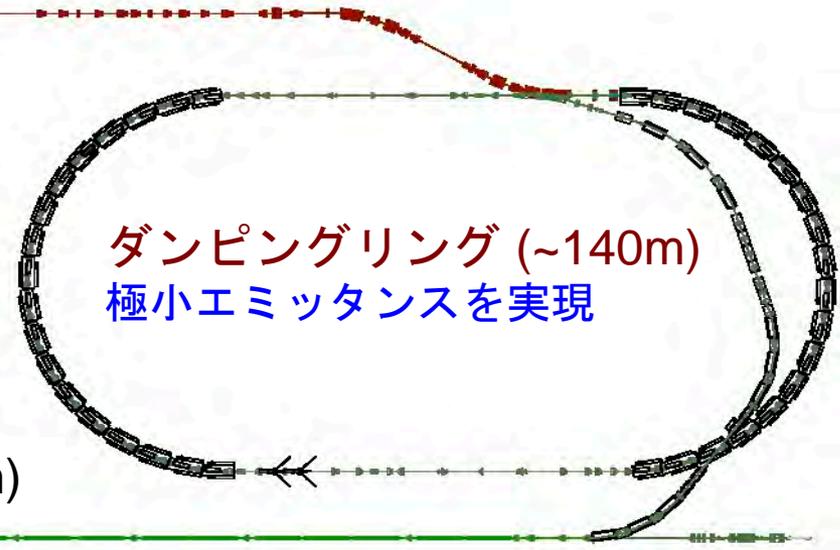
CFF



ATF2: 最終収束系試験ビームライン

Goal 1: ナノサイズ・ビームの実現

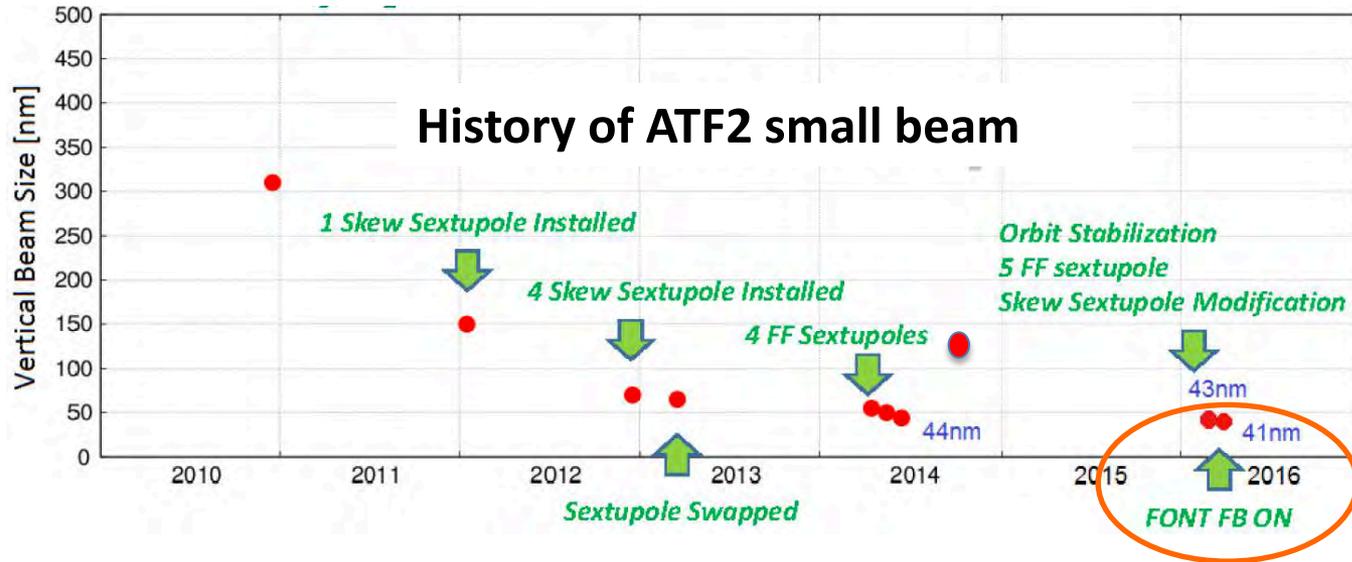
Goal 2: 安定なビーム位置の実現



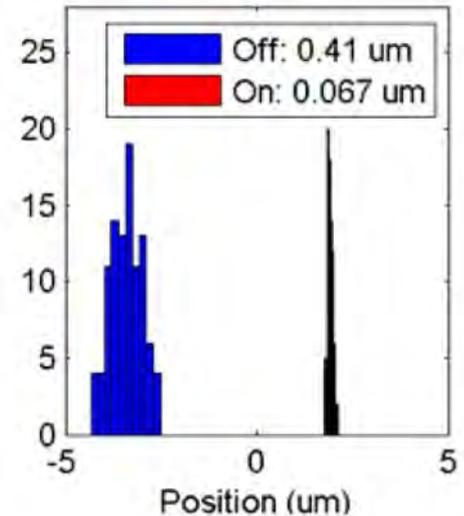
1.3 GeV S-バンド 電子線形加速器 (~70m)

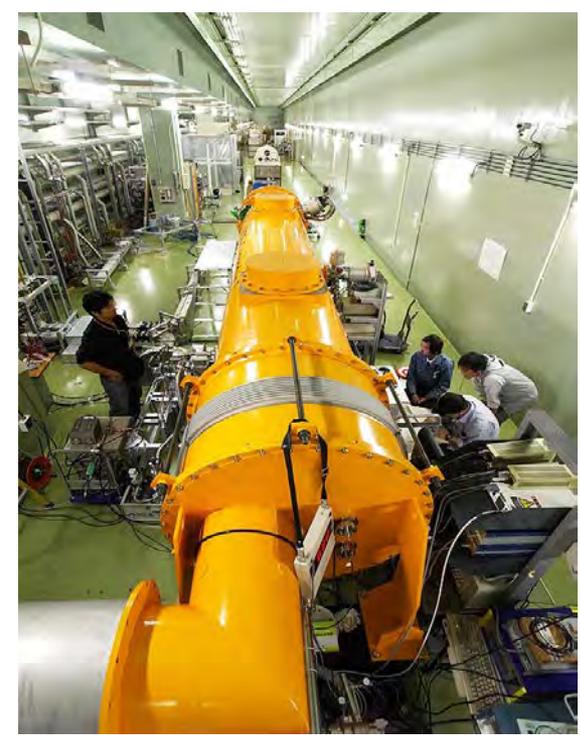
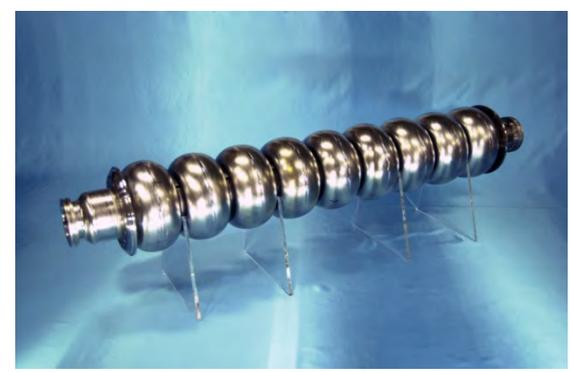
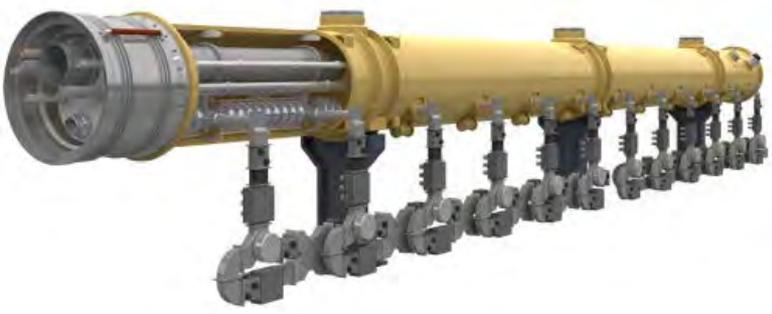


目標値37nmに対し41nmを実現 (ILCでは6nmに対応)

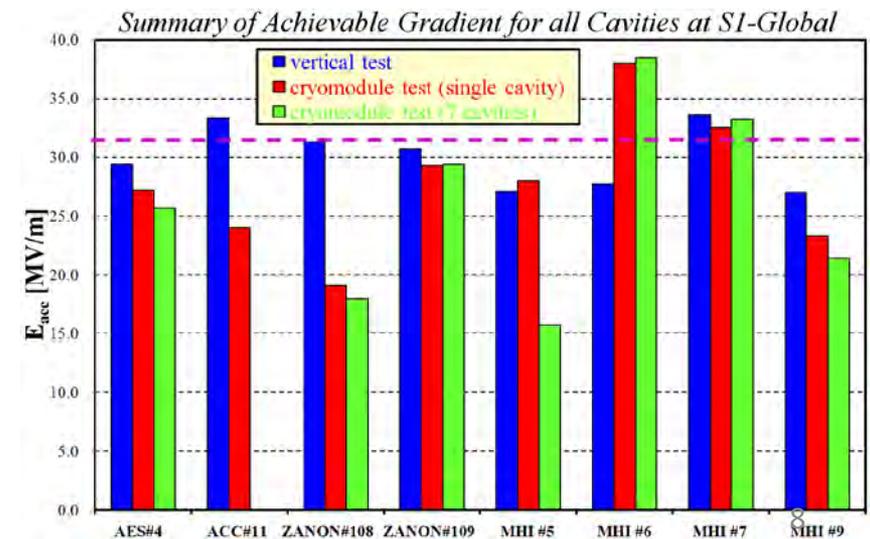
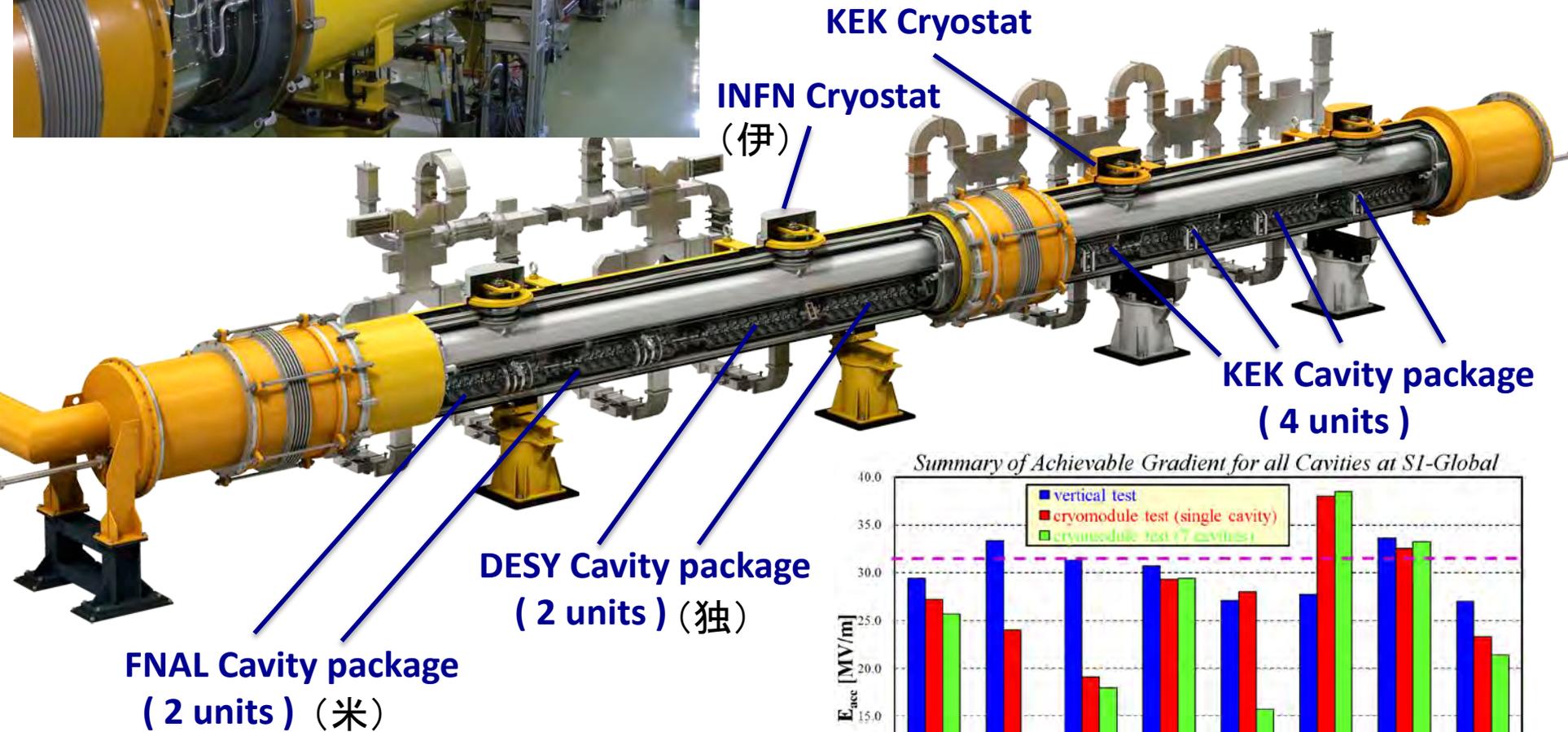


ナノメートル級のビーム安定性

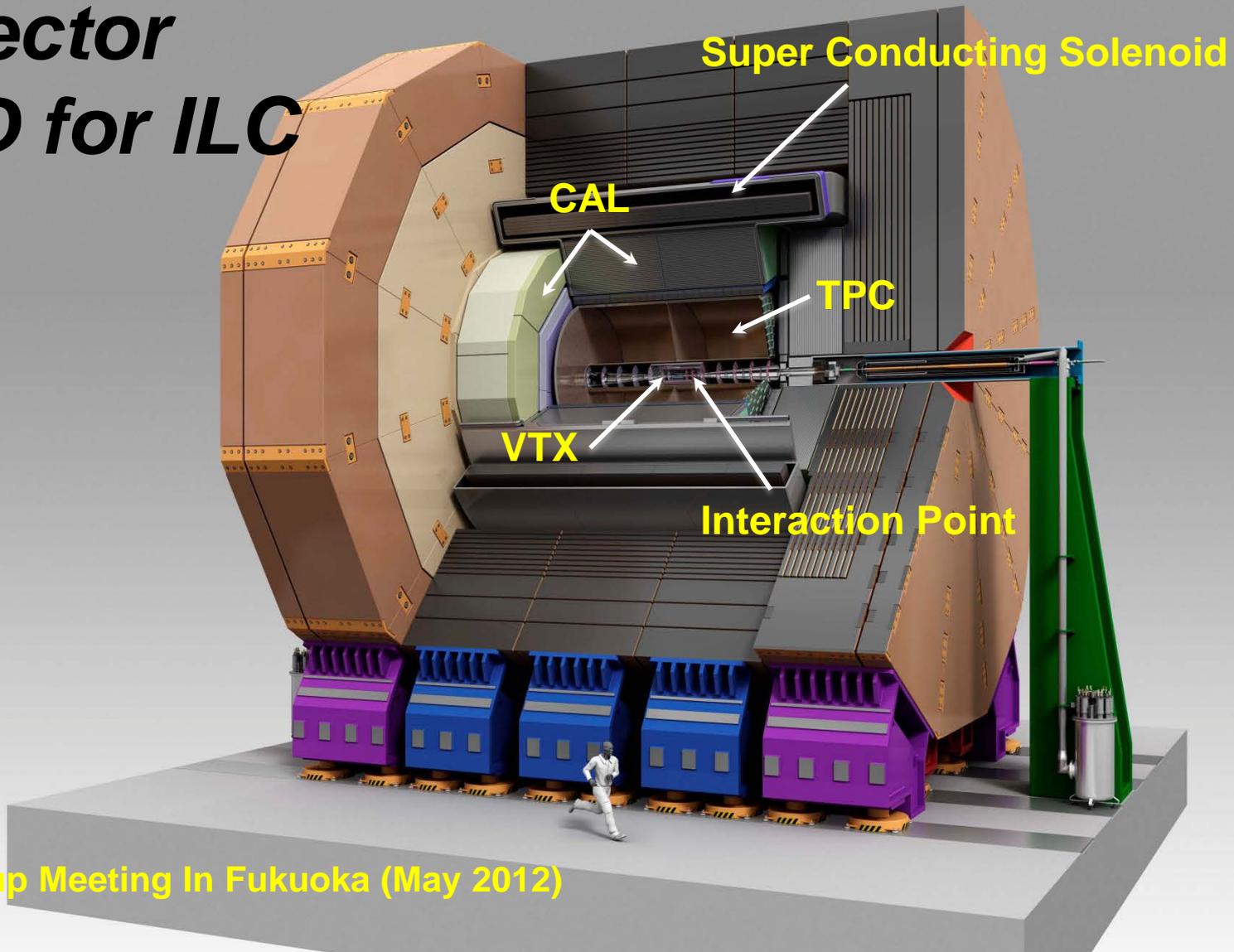




2010年6月 - 2011年2月



Detector R&D for ILC



Rey Hori

ILD Group Meeting In Fukuoka (May 2012)

KEK-ILCアクションプラン(1)

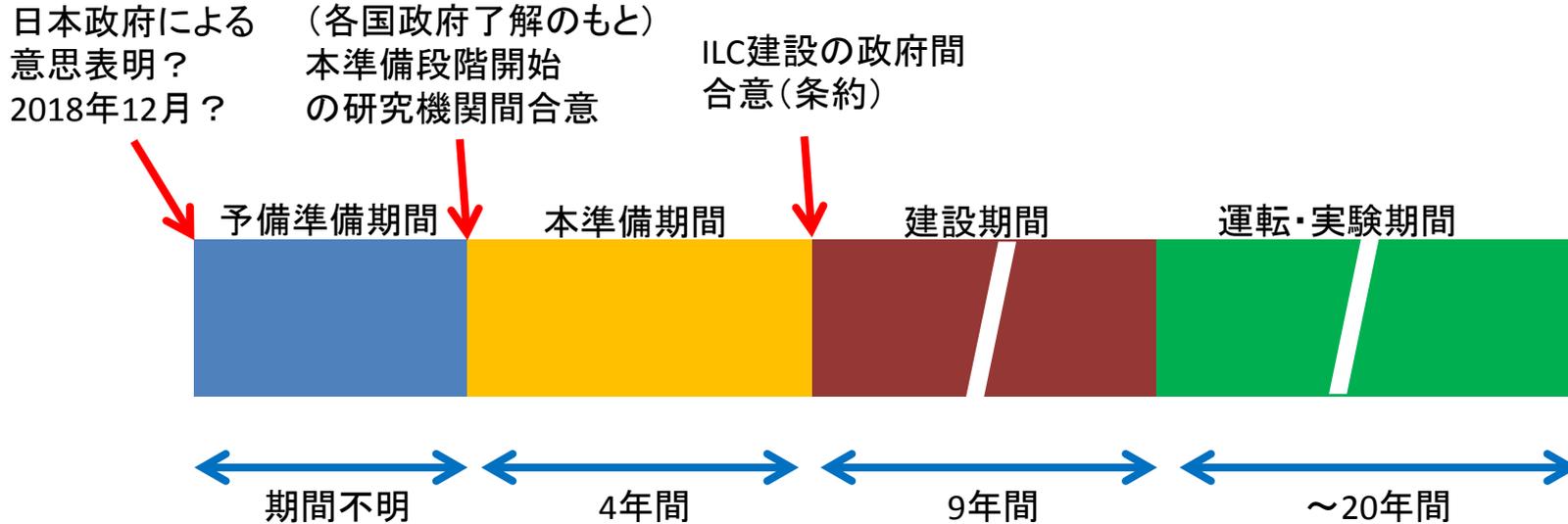


表 2. ILC 加速器・準備期間における技術課題

	予備準備期間	本準備期間			
	現在	P1	P2	P3	P4
加速器設計	加速器詳細諸元の固定	システム・シミュレーション、諸元の確認			
SRF	多連空洞・クライオモジュールによる ビーム加速の達成	工業化・量産技術システム実証、性能の安定化 ハブラボ機能実証、国際分担の確立			
ナノビーム	ナノビーム目標達成	ナノビームサイズ、安定性の実証			
陽電子源	陽電子源要素技術実証	アンジュレーター及び電子駆動・陽電子源の実証			
施設	予備調査、基本計画	地質地形環境調査、技術設計、仕様書・図面整備			
共通技術支援	共通技術支援・安全基本指針策定	共通技術・研究支援（ネットワーク、放射線安全等）			
事務管理	準備計画の立案・推進 ILC pre-lab の準備	総務、会計、国際協力、広報 ILC pre-lab の立ち上げ、準備推進			

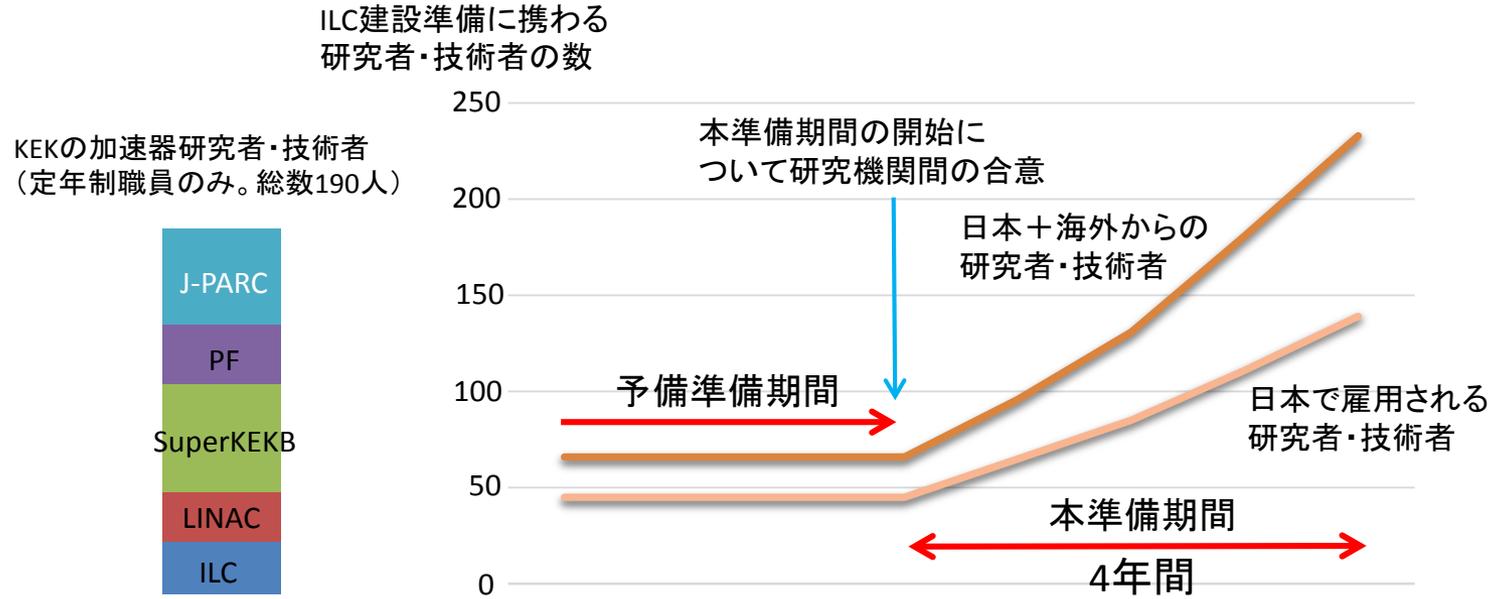
表 3'. ILC-250 加速器・準備期間に必要な人材案 (FTE)¹⁾

	予備期間 2)	本準備期間 ³⁾				ILC250 建設期間 4)		付記
	現在	P1	P2	P3	P4	C1	C2	
加速器： 日 ：外国	42 ≥ 20	54 28	74 41	98 65	122 89	160	305	日：特に SRF 量産化技術実証・習熟要 ⁵⁾ 欧米：量産化技術は経験済み ⁶⁾
施設：日 ：外国	3 1	11 3	11 5	13 5	17 5	50	60	日：中心的に推進。アウトソーシング活用 外国：専門的協力
共通：日 ：外国	2 1	7 3	10 4	13 6	14 7	100	110	日：中心的に推進 外国：専門的協力 ⁷⁾
管理：日 ：外国	5 3	8 4	10 6	14 8	18 10	75	135	日：中心的に推進 外国：専門的協力。各地域での事務管理 ⁸⁾
合計	≥ 77	118	161	222	282	385	610	

補足説明：

- ILC 準備期間における外国からの人材貢献比率を 20～40% レベルで増強する。そのうえで、政府間合意に基づく本計画・建設での、更なる外国からの貢献増強に備える。
- 予備期間：現在の取り組み状況（一般的先端加速器技術開発予算での取り組み人数）。
- 本準備期間：ILC 建設準備の為の予算を伴い人材がサポートされる。この表の数値には、国際的に進行中の加速器建設等で、すでに培われている潜在的人材数は含まれていない。
- 建設期間：ILC-TDR に記述されている労務数を FTE で表した人材数。
- 日本において、超伝導加速空洞量産（工業化）技術およびハブラボ機能（計画統括、品質管理、性能評価）の実証のために人材養成を必要とする。
- 欧米は、ILC 本準備期間までに、独自の計画（E-XFEL、LCLS-II など）のなかで、すでにその機能検証が実施されており、それぞれの研究所（DESY/INFN-LASA、CEA-Saclay/CNRS-LAL-Orsay、SLAC、Fermilab、JLab 等）で、50~100 人規模が実働経験をもつ。これらの計画で経験が積まれている人数は、この表の人数に含まれていない。
- 共通技術支援は、建設期に迅速な増強が必要であり、今後の検討課題。
- ILC 研究所の設立準備にむけた人材は、今後のプロジェクト判断後に検討。

KEKからの研究者・技術者移行の可能性



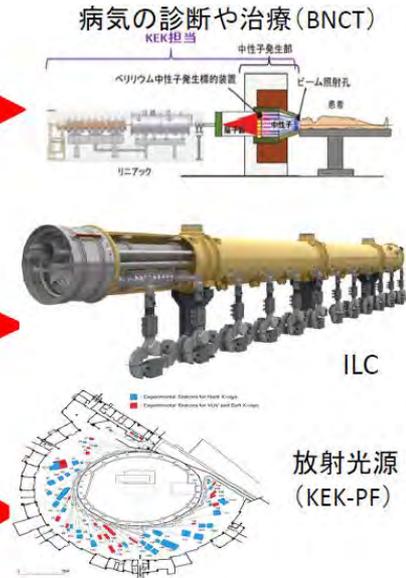
可能性のあるシナリオ

本準備期間の開始時期によっては本準備期間中にKEKから50-60名の経験を積んだ研究者・技術者が参集する可能性がある。その場合、さらに40名程度の研究員の雇用、業務委託でKEKがPre-Labの中心的役割を果たすことが可能。

加速器の将来性

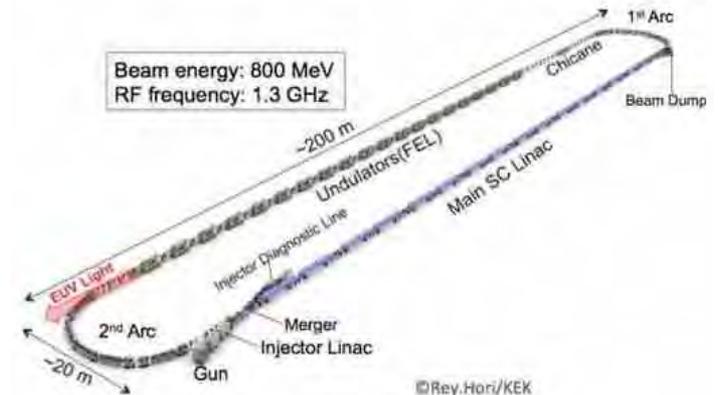
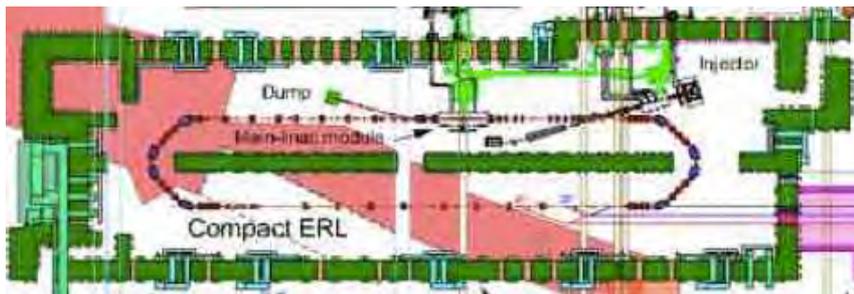


手のひらサイズの加速器
1930年代、ローレンス



核医学検査薬 (^{99m}Tc) 製剤への応用を検討
超伝導電子加速器による ^{99}Mo 製造方法を確立し、100%国産化を目指す。

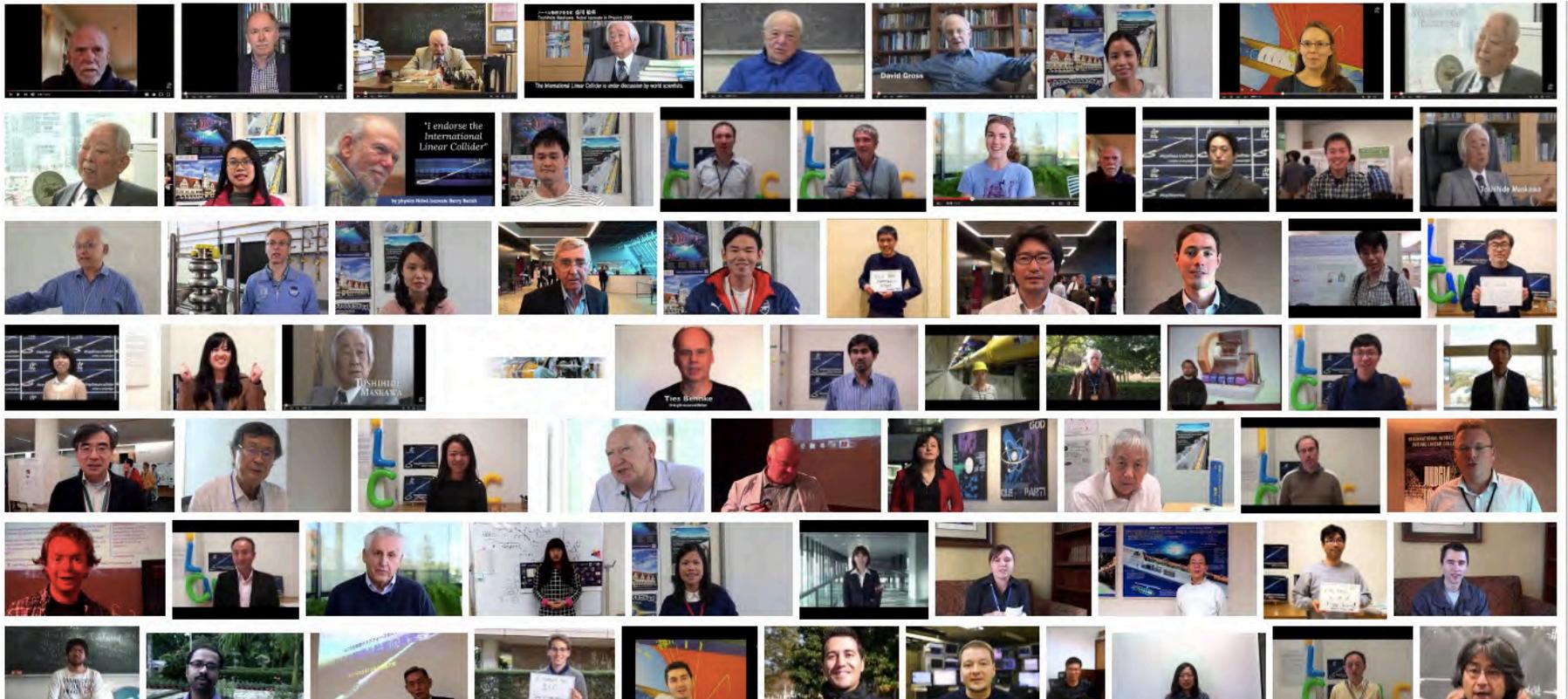
半導体リソグラフィー用光源の検討
ERL (エネルギー回復リニアック) を用いた半導体リソグラフィー用 EUV 光源の開発を目指す。



- 2012年 ICFA(国際将来加速器委員会)
“ILCは技術的に成熟しており、ヒッグスの精密測定に比類のない可能性をもたらす。ICFAは改めてILCに対する支持を表明する。”
- 2013年5月 「素粒子物理に関する欧州戦略」報告書
“日本の素粒子物理学コミュニティがILCをホストしたいとする提案を歓迎し、ヨーロッパの研究者は参加を強く希望する。参加について議論できる提案を希望する。”
- 2013年9月 ACFA(アジア将来加速器委員会)
“ACFA/AsiaHEPは日本がILCをホストすべきという日本の高エネルギー物理学コミュニティによる提案を歓迎し、日本政府がこのプロジェクトに取り組むことを期待する。”
- 2014年8月 米国P5(素粒子物理学プロジェクト優先順位委員会) US DOE
“ILCには強い科学的重要性とILCをホストしたいとする日本の動きがある。アメリカは適切な財政レベルで、米国が貢献できる重要な専門性においてILCの加速器と測定器の設計に関与すべき。もしILCが進むならより高いレベルでの参加を考慮すべき。”
- 2017年11月 ICFA(国際将来加速器委員会)
“ICFAはILCのエネルギーを250GeVに設定する案を支持し、日本が時機を逸することなくヒッグスファクトリーとしてのILCを実現するよう強く奨励する。”

■ Mylinearcollider キャンペーン

2014年10月に国内外の研究者、技術者に参加を呼びかけ。動画メッセージをYouTubeに投稿。半年のキャンペーンで30カ国以上から665名が参加。7名のノーベル賞科学者もビデオを提供している。



□ ILC百人委員会



経済界からは御手洗富士夫氏、奥田碩氏、出井伸之氏ら、文化人では有馬朗人氏、隈研吾氏、ロバート・キャンベル氏、弘兼憲史氏らが名を連ねる。それぞれの活動分野でILCの役割や意義などを発信することを目的に発足。

平成30年6月30日現在 129名

□ ILC推進国際シンポジウム(2018年8月5日、東京)



2名のノーベル賞物理学者シェルドン・グラショー氏、バリー・バリッシュ氏を招いて東京でシンポジウムを開催。約1000名が参加。

参加者年齢層: 3割が30代以下(10代 10.8%、20代 11.4%、30代 9.3%)

- 先端加速器科学技術推進協議会(AAA)は2018年7月現在、111社、2機関が参加。
- AAA会員からILC実現に向けた署名が7000以上集まっている。
- 2016 INEUSTAR (スペイン科学産業協議会)とAAAが加速器科学に関する緊密な情報交換と連携強化に向けた覚え書きを締結。スペイン産業界からもILC建設への期待が寄せられる
- 2016 仏ストラスブールでILCに関する産業セッションを実施。フランス企業からのILC参加への関心が表明される



スペインとの署名式の様子
Javier Caceres 氏(INUESTAR)と西岡喬氏
(AAA)



フランスストラスブールでのIEEEの様子

ヨーロッパの状況

- ❑ CERNが円形電子・陽電子衝突型加速器であるLEPの成功後、そのトンネルを利用してLHCを建設。その後施設を有効利用しつつLHCの高輝度化を進めることを決定。引き続き高エネルギー化も検討している。
- ❑ このような一連の円形加速器計画を持っているため、ヒッグスファクトリーの重要性は十分理解しつつも方針を大転換してまで欧州に建設することは行わず、ILCへの期待と参加の意欲を表明した。

アメリカの状況

- ❑ 2004年にアメリカが誘致に乗り出した際、超伝導高周波空洞の技術やコストに不定性が非常に大きく、さらにヒッグス粒子も見つかっていなかったため、500GeVは開始時のエネルギーであってさらに大幅なエネルギー増強も可能でなければならぬとされた。
- ❑ これらの要因から総コストが非常に高いものと評価され、アメリカ政府内でSSCの二の舞になる懸念。政府の高いレベルでILCはアメリカに誘致しないことが決定された。
- ❑ このためにアメリカは国内計画としてはFNALのニュートリノ研究を進め、コライダー実験は海外に展開する方針をとった。日本でILCが実現するならぜひ協力し、参加したいとの姿勢。

 2012年になってヒッグス粒子が発見され、同じ時期にE-XFELなどによって超伝導高周波空洞に明確な見通しができたために日本の研究者がILCの日本誘致を提案した。このようにして日本が誘致を検討し、欧米の研究者が大きな期待を込めて応援するという構図が出来上がった。

超伝導RF技術に関する日本の優位性

- 超伝導RFを大型加速器で初めて実用化したのはKEKのTRISTAN。その後大電流用超伝導空洞やクラブ空洞を実現することでこの技術を主導してきたのは日本の加速器研究者と日本企業。
- その後KEKのSTFでILC用超伝導空洞の開発を進め、欧米で作られた空洞と日本製空洞をつなぎ合わせるだけで全体として性能を発揮させるノウハウの確立にまで至っている。

ナノビーム技術における日本の優位性

- KEKのATFで国際協力によってナノサイズ・ビームの実現とその安定性の確保を目標にした研究開発。すでに40ナノメートルのビームサイズが達成。
- 安定性に関しても十分な応答速度をもつフィードバックシステムの開発によってILCの仕様を満たすメドがついている。
- KEKではこれ以外にもKEKB加速器で極小サイズのビームを実現し安定に取り扱う技術を長年にわたって蓄積。これによってルミノシティの世界記録が樹立されていることもATFでの達成の背景にある。



日本では超伝導RFとナノサイズ・ビームという2つの基本的な技術において優れた実績があり、海外の研究者からの高い信頼と期待につながっている。

- ILCを日本に誘致しない場合でも電子・陽電子衝突実験によるヒッグス粒子の精密測定は必須。世界の研究者コミュニティは協力してほかの可能性をを追及する流れが加速。
- CLICはCERNで開発されているリニアコライダーで、ILCと異なり常伝導RFを用いて最終的には1TeVを越えるエネルギーを狙う計画。現状ではILCに比べて技術的成熟度はまだ低いと考えられているが、これを早期に実現し、当面250GeV付近のエネルギーでヒッグスファクトリーとして運転しようとする議論が起こり得る。
- CEPCは中国で検討が進んでいる周長100kmに及ぶ円形の電子・陽電子衝突型加速器で、ヒッグスファクトリーとしての早期実現を目指している。日本がILCを誘致しない場合はCEPCの実現に世界中が協力するという選択肢も浮上する可能性がある。