



KEK加速器活動紹介

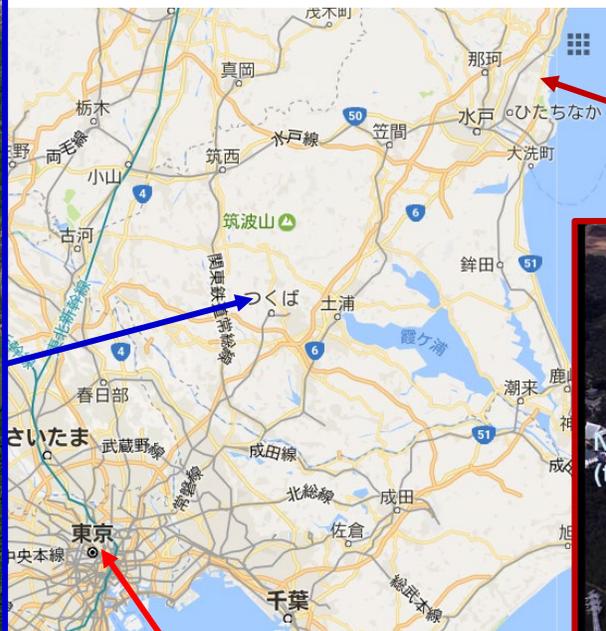
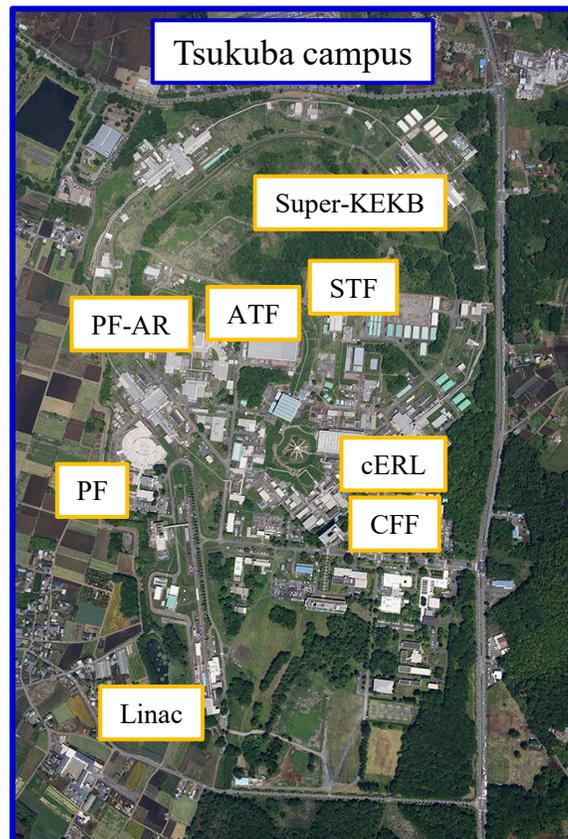
Kpro (EUV-FEL)の前座？

高エネルギー加速器研究施設 (KEK)

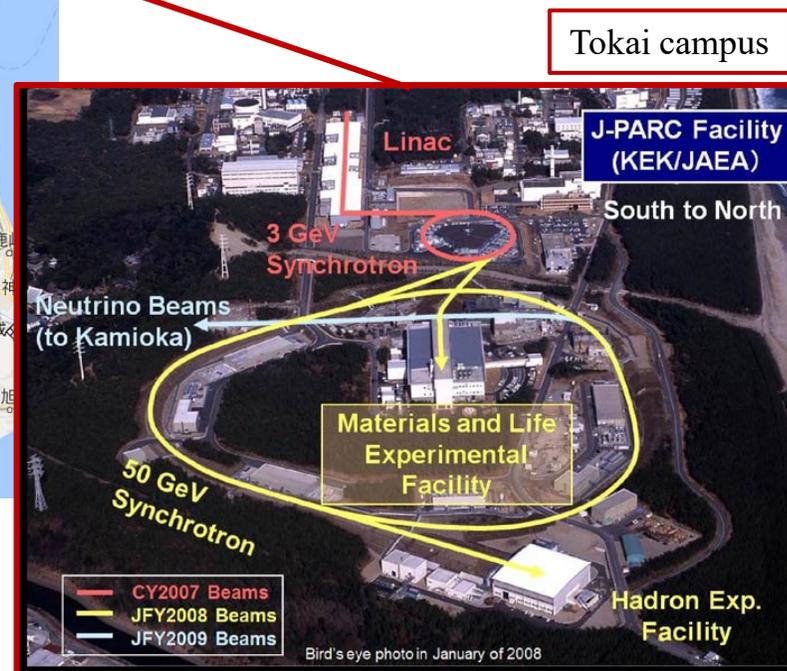
加速器研究施設

阪井寛志 (Hiroshi Sakai)

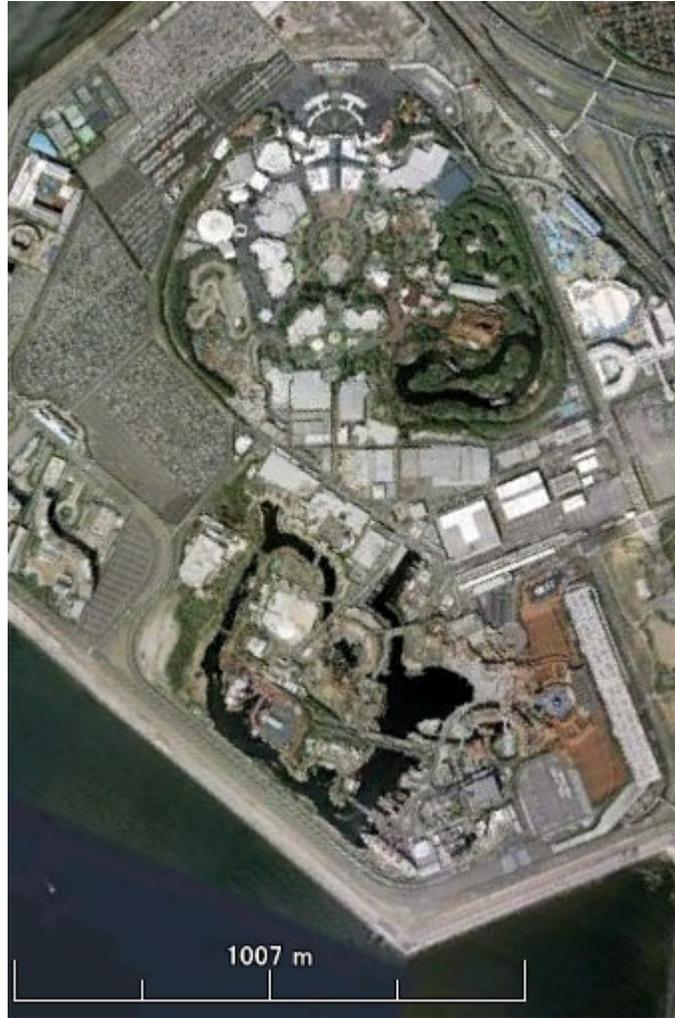
KEK-高エネルギー加速器研究機構-



Tokyo



東京ディズニーリゾートとKEKつくば



東京ディズニーリゾート



KEK

加速器を使って何をする。何ができるのか？



● 加速器イメージ図



加速器を使って電子や陽子などの粒子を加速し、衝突。

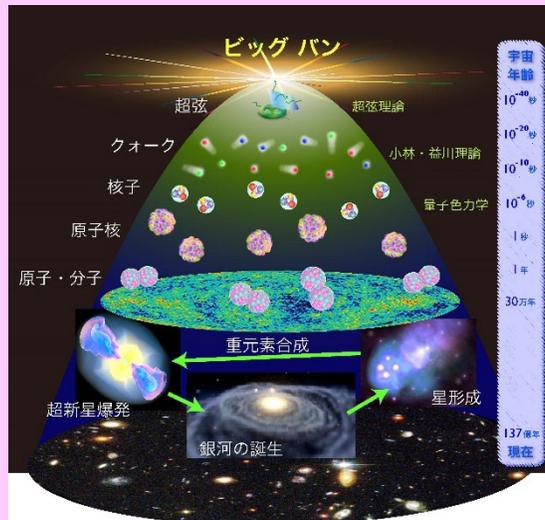
→ 素粒子実験 (新粒子探索)

高エネルギー粒子を用いて生成されるX線や放射光で → 新物質構造解析やたんぱく質、細胞の構造解析。

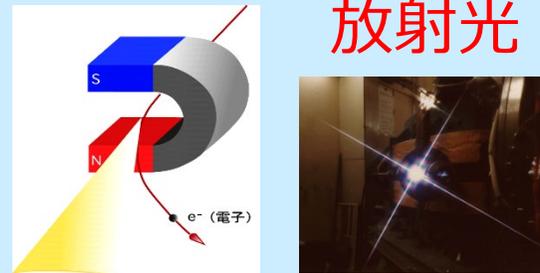
粒子線治療などの医学応用

加速器の基本構成

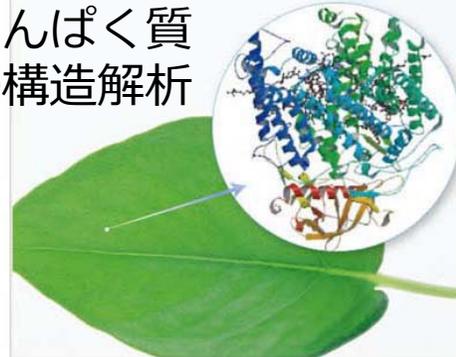
宇宙の起源・新粒子探索 (素粒子実験)



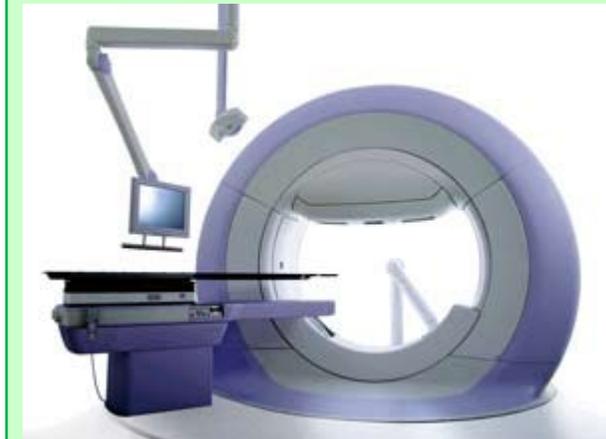
放射光



たんぱく質の構造解析



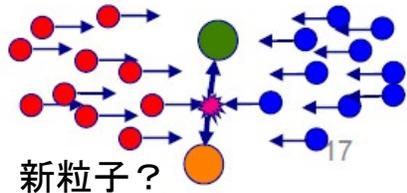
医療用加速器PET用の薬剤 ガン治療用陽子線加速器など



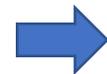
電子 e^-

陽電子 e^+

高エネルギー加速器の歴史 (先端加速器の発展)



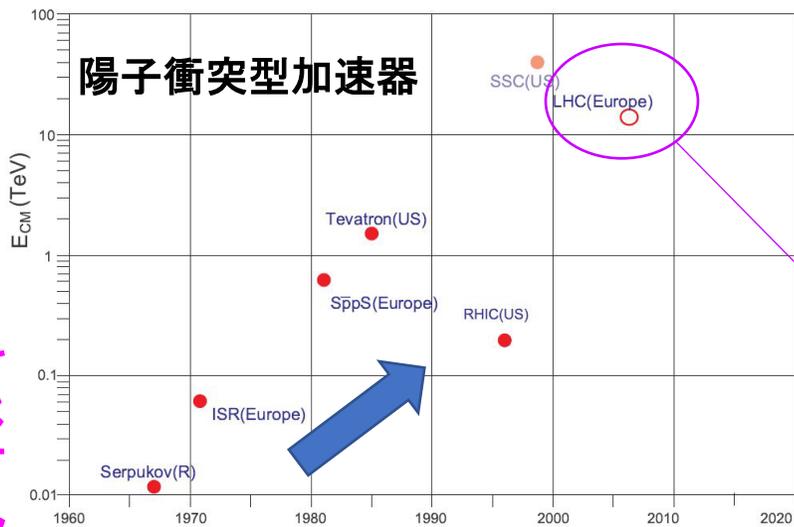
電子陽電子などを高エネルギーで新粒子の探索生成を行う。



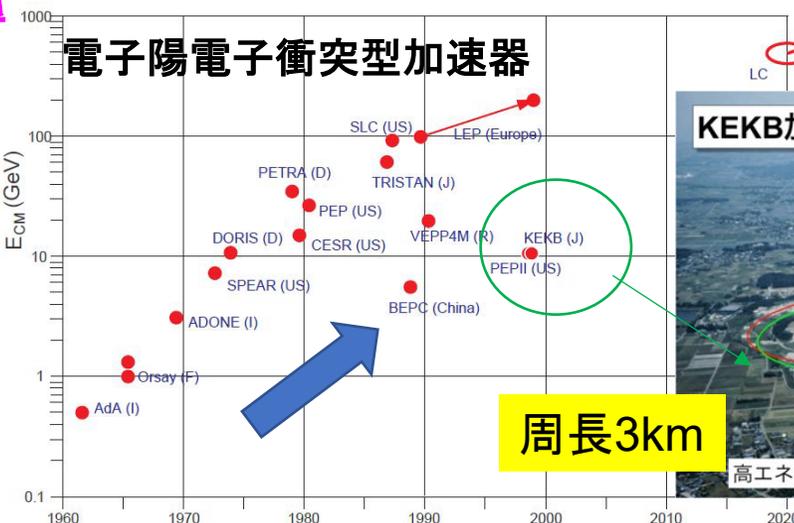
高エネルギーで衝突頻度を上げたい。

より高エネルギー(高加速勾配)で
より大電流ビームの加速が重要

衝突エネルギー



ノーベル物理学賞:
2008年: 小林益川理論の証明
クォークが3世代以上。
(KEKB加速器が実験で証明)
2012年: LHC加速器でHiggs粒子発見。



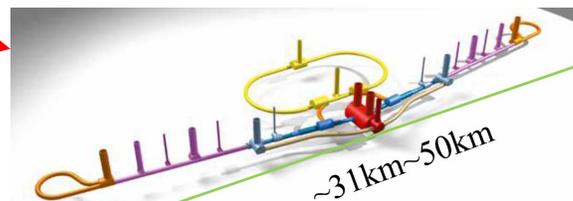
KEKB加速器

Super KEKB

周長3km

高エネルギー加速器研究機構 (茨城県つくば市)

LHC: CERN(ジュネーブ)周長27km



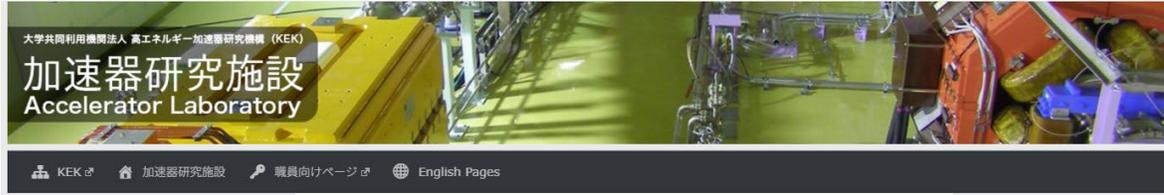
(将来) Linear collider (LC)

LHCでは超伝導電磁石を
KEKB, LCでは超伝導空洞を使用。

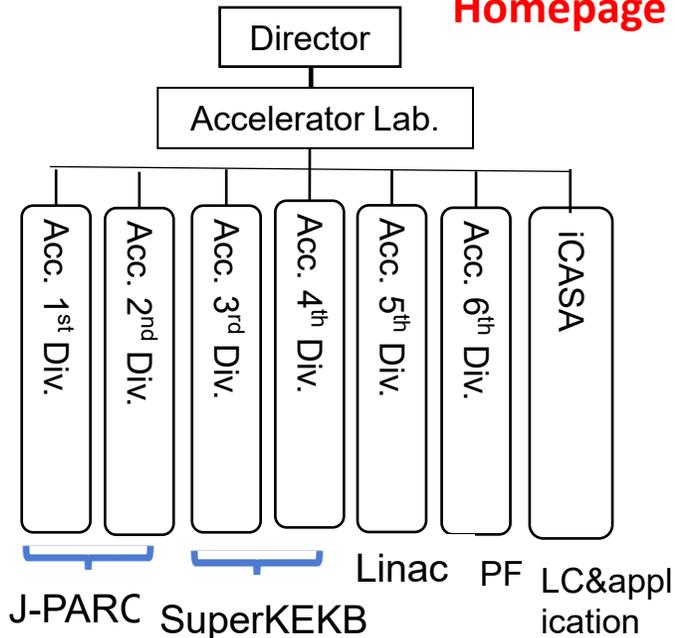
KEK 加速器研究施設

加速器研究施設は下記の7つのdivisionからなり、J-parc, Super-KEKB, LINAC, PF/PF-ARを運用しているとともに応用超伝導加速器イノベーションセンター(iCASA)でILCと超伝導空洞を用いた応用研究を進めております。

<https://www2.kek.jp/accl/>



Homepage 若干リニューアル



今日は最後
はiCASAで
EUV-FELの紹
介まで

加速器は高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行なわれている研究活動の基盤であり推進力です。加速器研究施設は、世界最先端の加速器を開発、建設するとともにそれらの運転・維持及びビーム性能の向上を担い、素粒子・原子核物理学、物質・生命科学などの基礎科学研究の推進のために高性能で安定したビームを学術界だけでなく産業界を含む国内外の研究者に提供しています。また、さまざまな将来の加速器科学と関連技術の研究開発に取り組んでいます。

つくばキャンパスでは、小林・益川理論を実証し、2008年のノーベル物理学賞の受賞に貢献した衝突型加速器KEKBをアップグレードして飛躍的に高いビーム性能をめざすSuperKEKBとその入射器である電子陽電子リニアックを運用しています。また、放射光利用の世界的パイオニアである光源加速器(PFとPF-AR)や世界的にもユニークな低速陽電子実験施設を運用するとともに、将来の放射光源加速器の検討や研究開発を進めています。応用超伝導イノベーションセンターiCASAでは、国際リニアコライダーILCの実現にむけた技術開発を試験加速器施設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等において進め、エネルギー回収型リニアックcERLを用いた応用研究、次世代の半導体製造用光源として期待されているEUV-FEL光源の開発研究も行っています。

東海キャンパスでは、原子力機構との共同プロジェクトであるJ-PARCにおいて、大強度陽子加速器の運用と性能向上を行うとともに、筑波大学と協力して最新のがん治療として期待されているホウ素中性子捕獲療法のための陽子加速器iBNCTを運用しています。

加速器研究施設では米国(FNAL、SLAC、Cornell大学、JLab等)、アジア(IHEP(中国)、SSRF(中国)、POSTECH(韓国)、NSRRC(台湾)、BINP(ロシア)、RRCAT(インド)等)、ヨーロッパ(CERN、DESY(ドイツ)、INFN(イタリア)、CEA(フランス)、STFC(イギリス)等)などの世界の加速器研究者とさまざまな研究協力・交流を展開しています。また、企業等外部機関との共同研究により、医学利用・産業応用のための加速器の研究開発を進めています。



加速器研究施設長 小関 忠
e-mail: tadashi.koseki@kek.jp

プロジェクトとメンバー

大強度陽子加速器施設 (J-PARC)

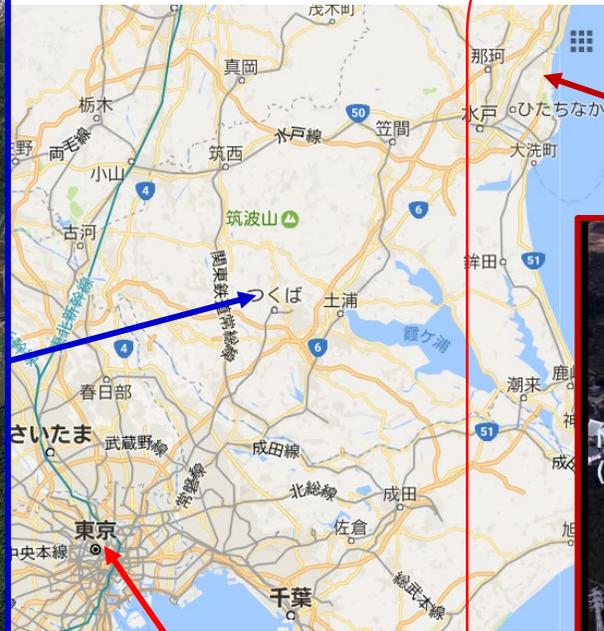
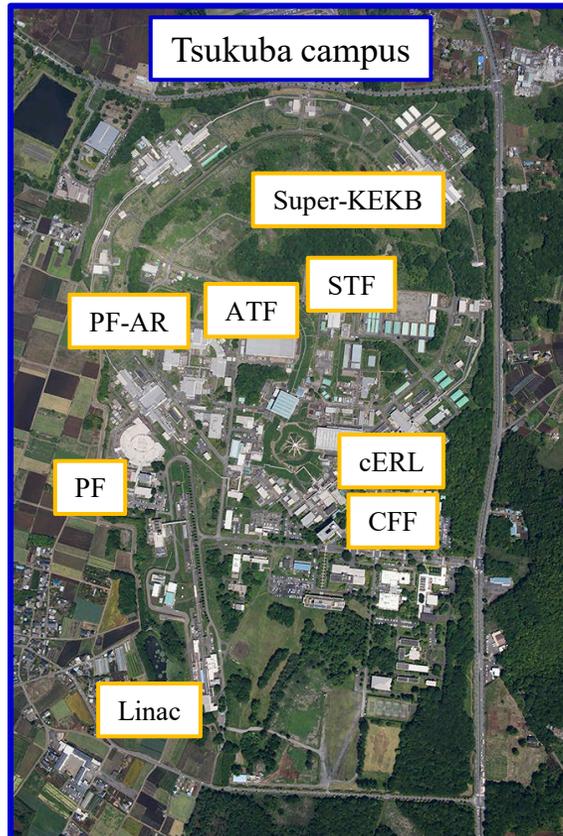
SuperKEKB

PF/PF-AR

電子陽電子入射器 (LINAC)

iCASA

KEK東海

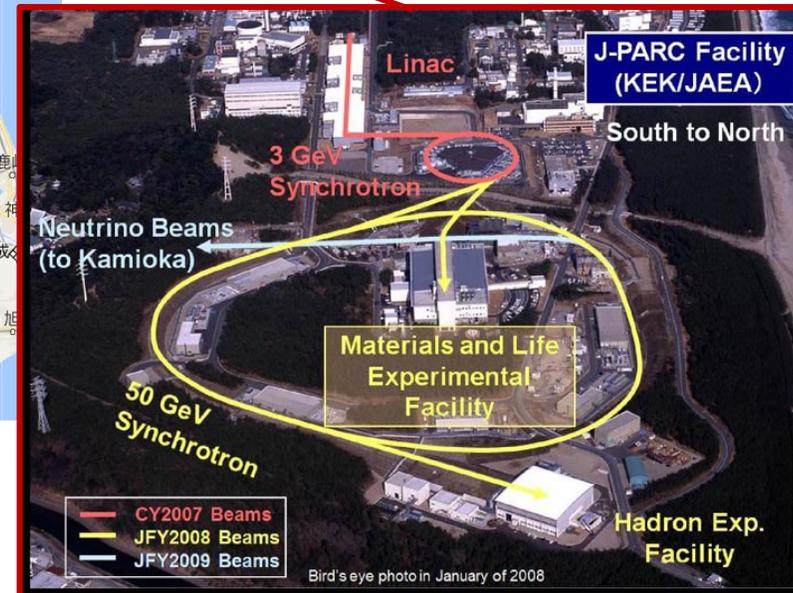


Tokyo

KEK東海

J-Parc

Tokai campus

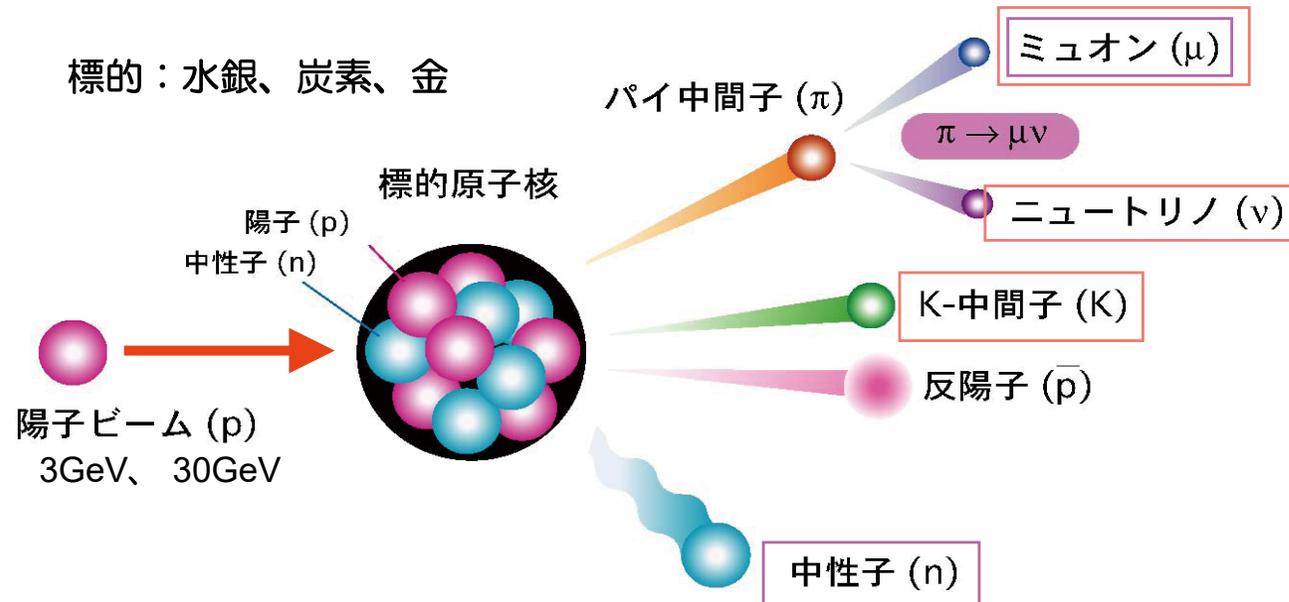


J-PARCの目的

KEK東海

自然科学の探究

大強度の陽子ビームを作り、それを標的に衝突させて作られる二次粒子ビームを用いて、様々な自然科学の研究を行うことです。



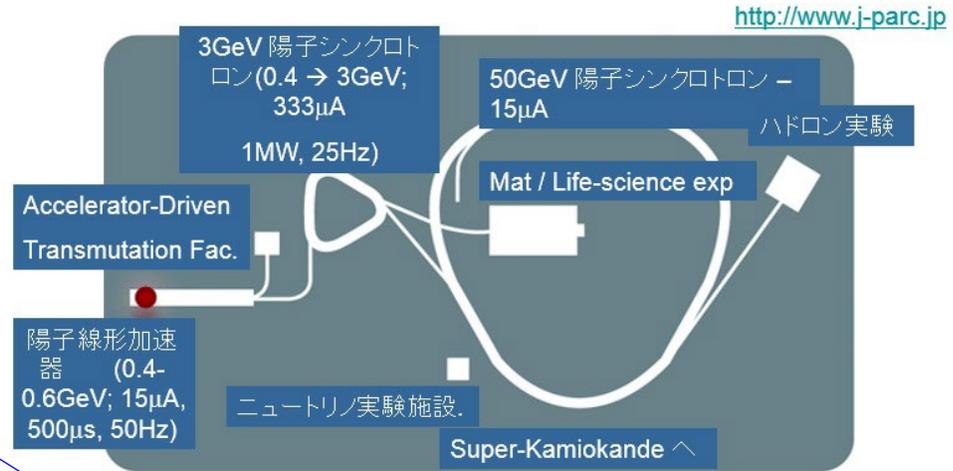
J-PARC加速器の最大の特徴は、たくさんの陽子を実験に供給できることです。
バンチとよばれる陽子のかたまりに含まれる陽子数は世界一です。

KEK東海(J-PARC)の粒子加速器



主に陽子。及び、陽子が物質と反応して出来る二次粒子

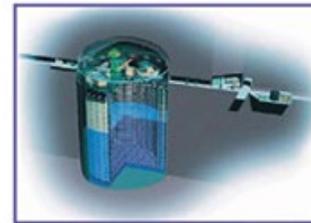
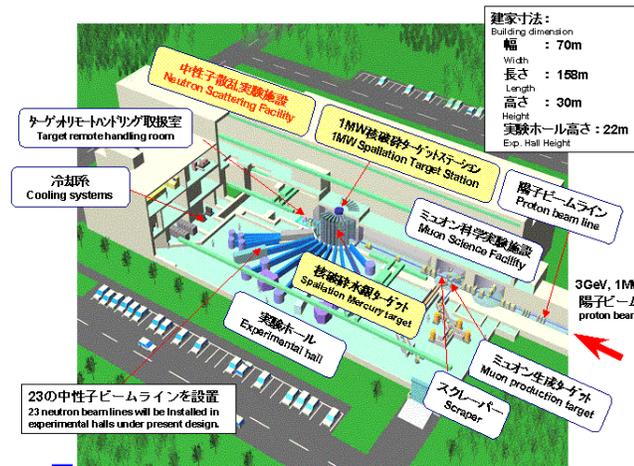
大電力の陽子加速器で中性子、中間子、ニュートリノ等の二次粒子を生成し、物質・生命・原子核・素粒子の実験で利用。



中性子利用 (物性実験) 利用実験

ニュートリノ実験 (素粒子実験)

物質・生命科学実験施設 (中性子散乱/ ミュオン科学 実験施設)
Material and Life Science Experimental Facility / Neutron Scattering / Muon Science Facility



Super-Kamiokande (ICRR, Univ. Tokyo)



ミュオン科学 (別のKpro)

2015年: ノーベル賞(梶田)

J-Parc コンタクト パーソン (KEK加速器 第1、第2系)

<https://ahfb10.kek.jp/ACCL-12/index.html>



加速器第一・第二研究系
J-PARC・iBNCT加速器・ミュオンリニアック



加速器第一研究系主幹

教授 發知英明

(連絡先: hideaki.hotchi@j-parc.jp)



加速器第二研究系主幹

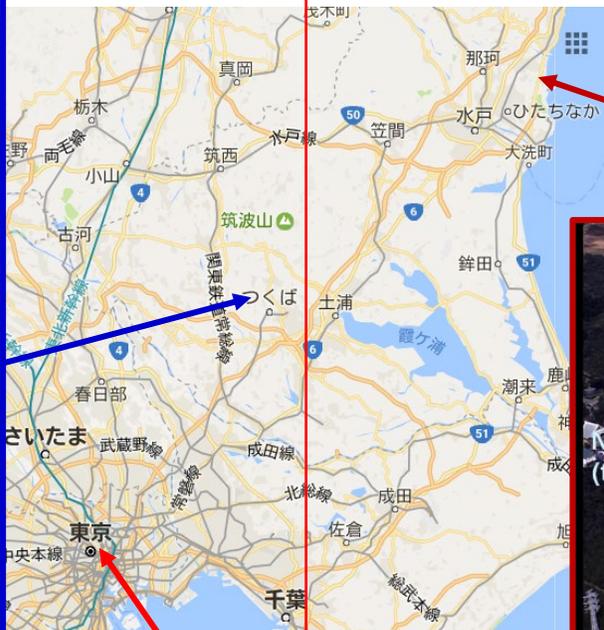
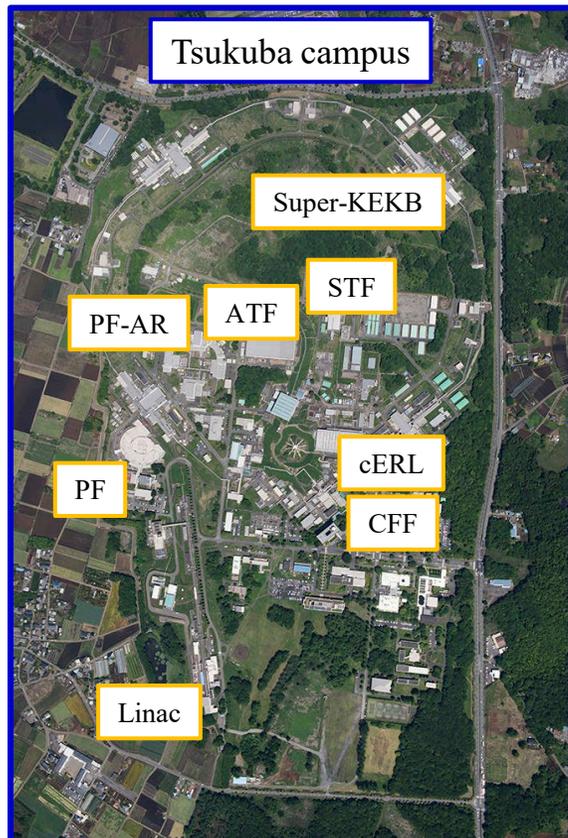
教授 佐藤洋一

(連絡先: yoichi.sato@j-parc.jp)

KEKつくば

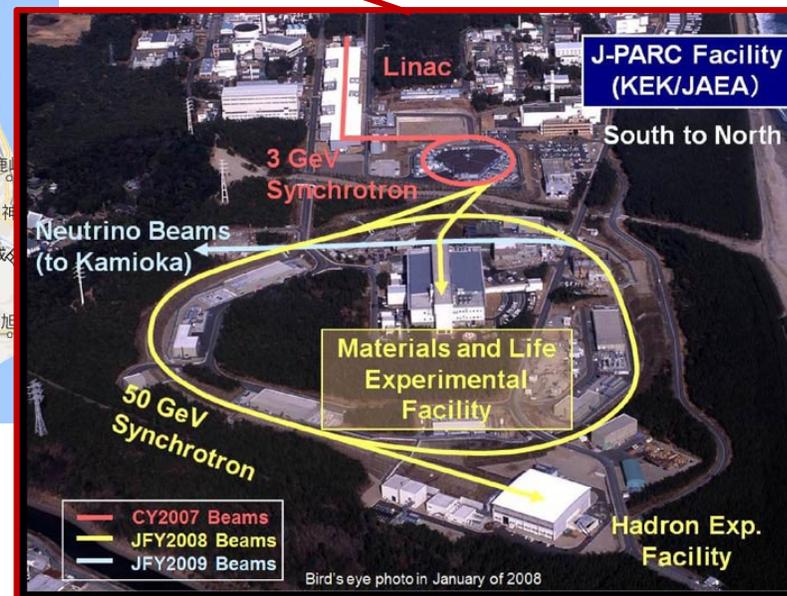


KEKつくば



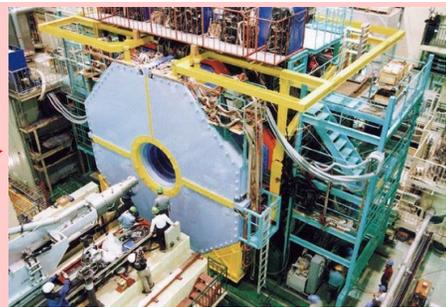
Tokyo

Tokai campus



KEK (つくば)

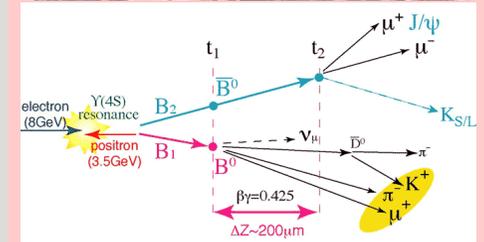
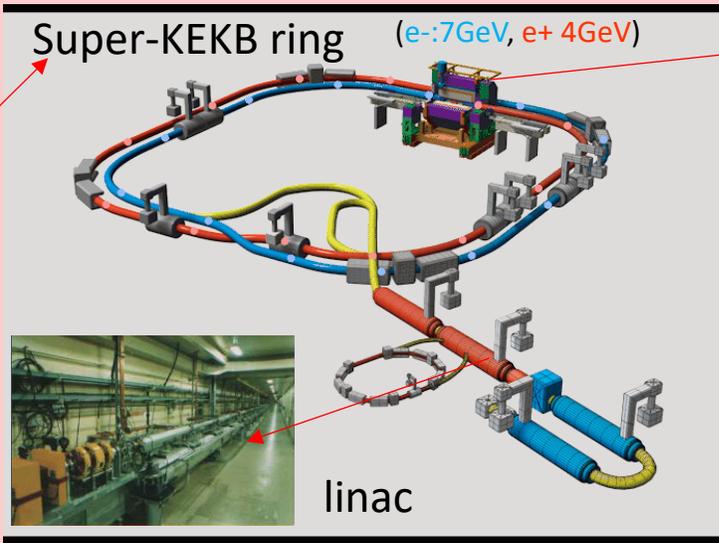
素粒子実験用Super-KEKB加速器



ノーベル物理学賞：
2008年：小林益川理論の証明
(クォーク3世代：CP対称性の破れ)

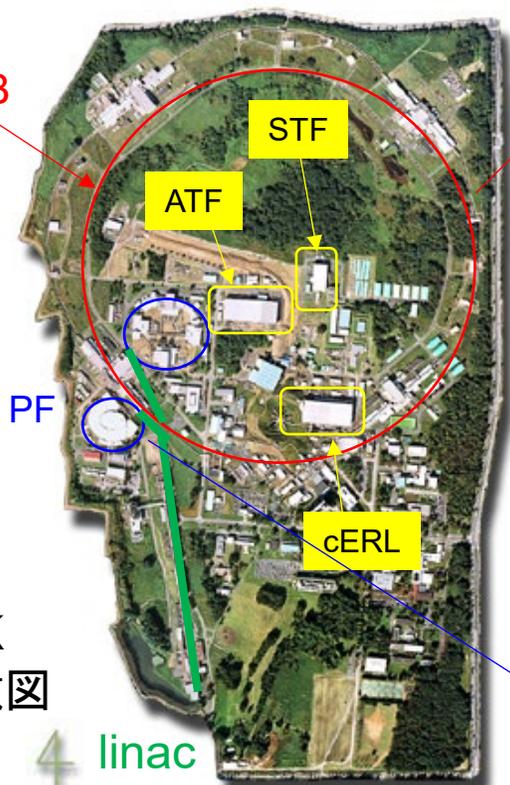


<https://www2.kek.jp/ja/newskek/2008/sepoct/nobel.html>



B中間子のCP対称性の破れなど新物理の探求を行う。
(宇宙の始まりがわかる。)

Super-KEKB
(周長3km)



KEK
鳥瞰図

Photon factory (PF) (放射光源施設)

2000年ノーベル化学賞：

臭素ドー
プポリエ
チレン解
析@PF



2009年ノー ベル化学賞：

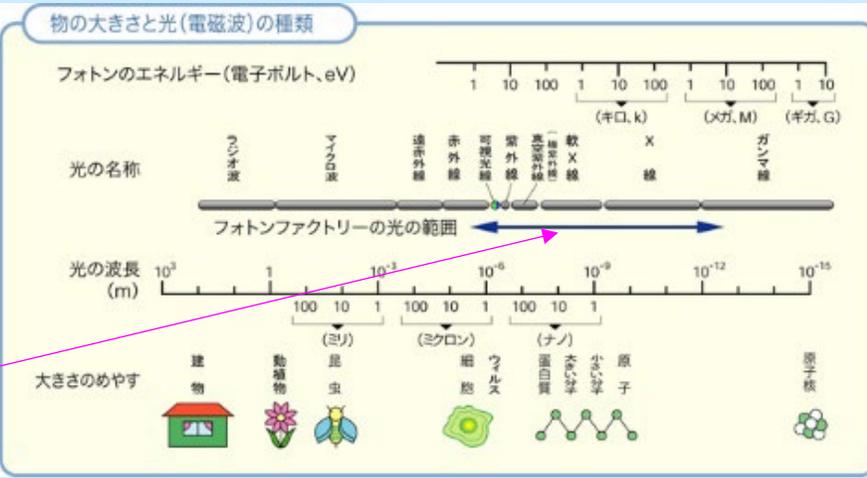
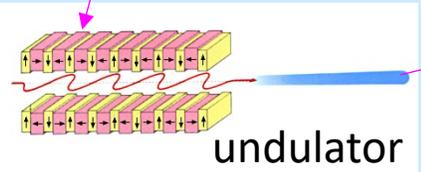
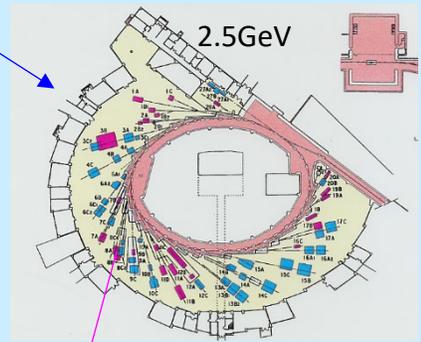
リボゾー
ム結晶解
析@PF



Super-KEKB: e+, e+ collider
素粒子実験のため

PF: (Photon Factory) 2.5 GeV
PF-AR: 6GeV
物質生命科学探索のため
(Photon Science)

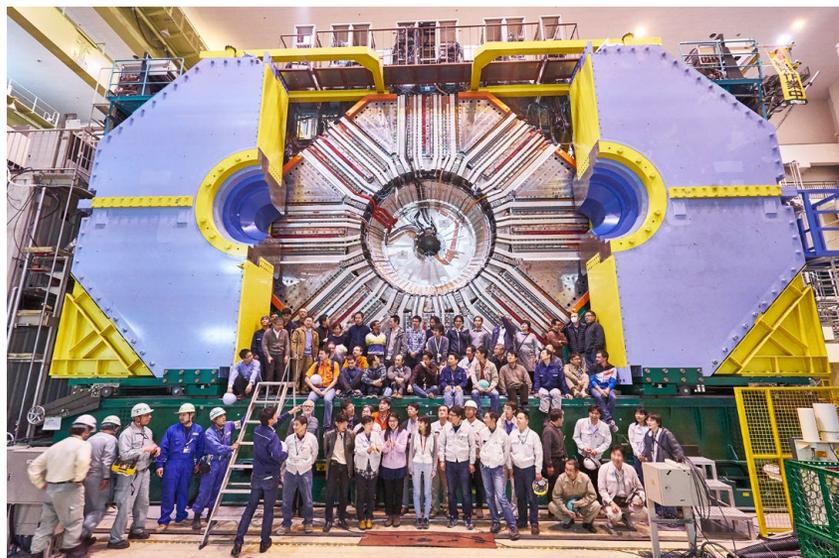
STF, cERL:
Test facility for
超伝導空洞と用いた先端加
速器開発とその応用



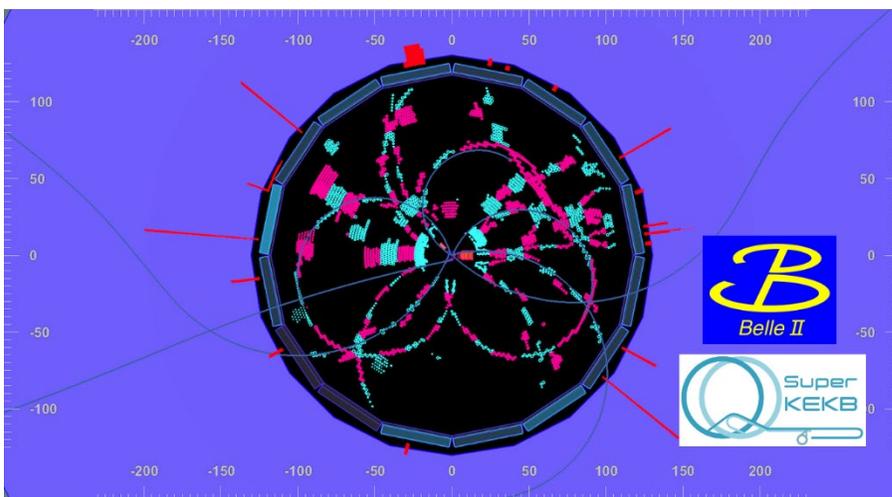
電子をたくさん曲げるとたくさんの放射光 (可視光~X線まで) が出る。
その放射光で、様々な物性実験、タンパク質の構造解析などを行っている。

Super-KEKB & BELLE II 実験

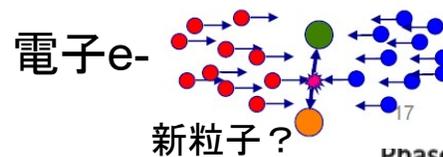
大型加速器実験は国際協力で行っている



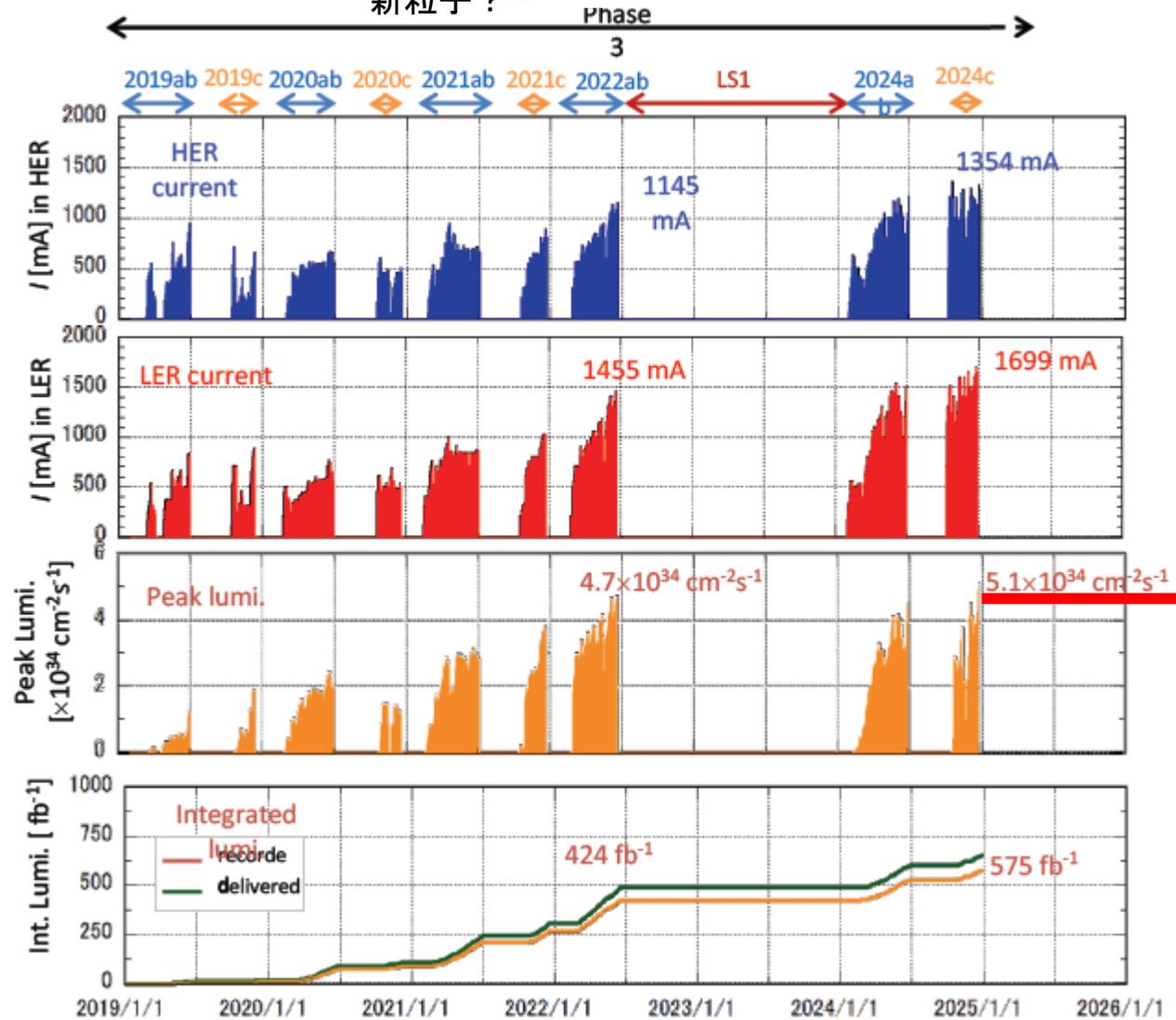
新しい測定器 Belle-II (ビームの衝突の様子)



2018年
運転開始



多数のe-と
e+が衝突。



Luminosity (peak/integrated) : $5.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}/575 \text{ fb}^{-1}$

ルミノシティとは、ビームの衝突頻度で新粒子の発生率を表します。KEKは世界最高のルミノシティを有しています。

Super-KEKB コンタクト パーソン (KEK加速器 第3、第4系

<https://ahfb10.kek.jp/ACCL-34/index.html>



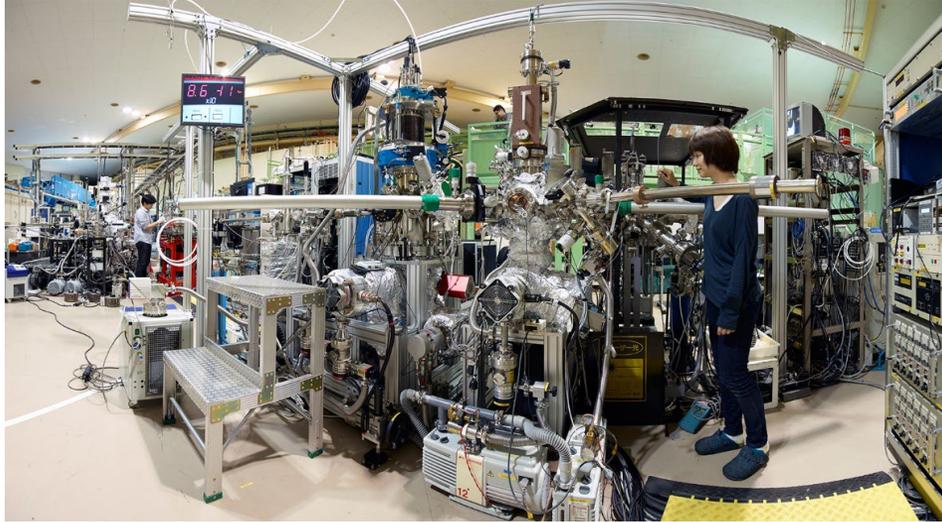
加速器第三研究系主幹/柴田 恭(Kyo SHIBATA)
役職：加速器研究施設 加速器第三研究系主幹 教授



加速器第四研究系主幹/飛山 真理(Makoto TOBIYAMA)
役職：加速器研究施設 加速器第四研究系主幹 教授

放射光リング(PF/PF-AR)

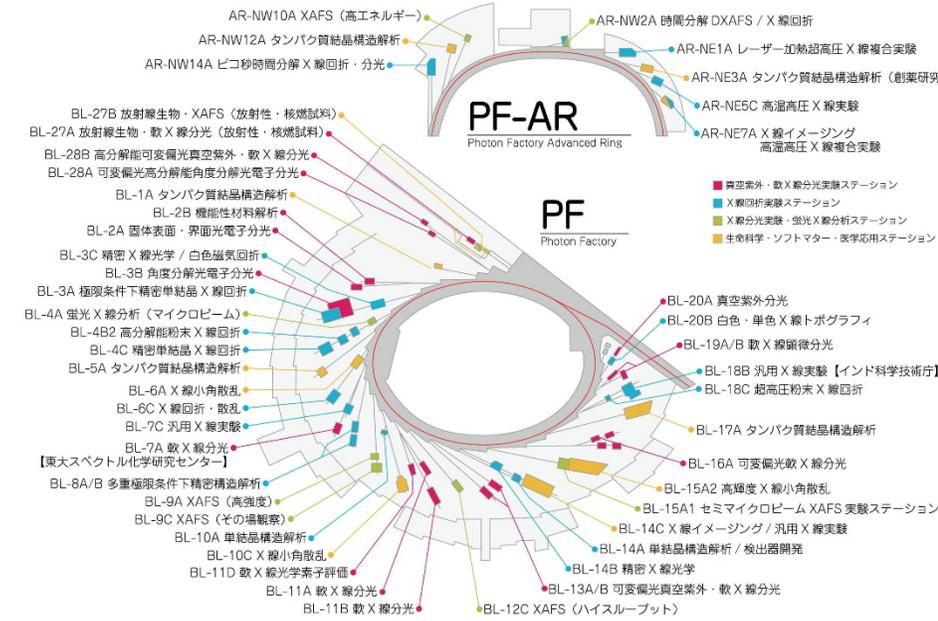
KEK フォトンファクトリーの実験エリアの様子



PF/PF-AR ビームラインで何ができるの？



宇宙：
はやぶさが小惑星から持ち帰った試料の分析



創薬分野

「統合失調症治療薬の創製」
アステラス

産業活用

「高性能・高品質タイヤの
新材料開発技術の確立」

地球科学

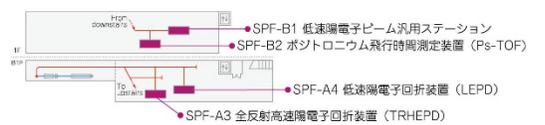
「地球磁場の源である液体核
の対流に二層構造を発見」

磁性科学

「ハードディスク等のスピントロニクスデバイスにおける
反強磁性スピンの可視化」

SPF

Slow Positron Facility



ユニーク利用者数
2500~3000人程度

| Facility | BL | Station |
|----------|----|---------|
| PF | 22 | 39 |
| AR | 8 | 8 |

他：考古学・科学鑑定など

放射光を用いた応用実験

PF/PF-AR コンタクトパーソン (KEK加速器第6系)

<https://www2.kek.jp/imss/pf/section/lightsource/>

加速器研究施設：加速器第六研究系

放射光を用いた物質・生命科学研究を推進するためには、放射光を発生させる技術が欠かせません。先端的な加速器研究により、放射光源の性能向上を図るとともに、効率的な保守整備・運転を行ない、高性能で安定な放射光を供給しています。既存の光源においては、一層のビーム安定化、トップアップ運転等の新規の運転法の開発、新しいタイプの挿入光源の開発などにより、より高度な放射光利用に対応した技術開発を行なっています。

また、加速器研究施設の他の研究系と協力して、将来光源の研究開発を推進しています。



加速器第六研究系主幹
帯名 崇
takashi.obina@kek.jp

LINAC コンタクト パーソン (KEK加速器 器第5系)



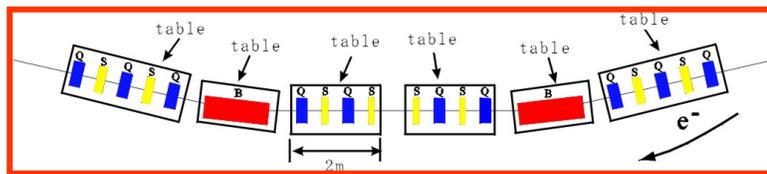
加速器第五研究系は、第三・第四・第六研究系と協力して、SuperKEKB衝突型リング、放射光リング（PF, PF-AR）へのビーム供給、将来計画に関連した開発研究などを推進しています。

<https://www-linac.kek.jp/ACC-5/index.html>



加速器第五研究系主幹/恵郷 博文 (Hiroyasu EGO)
役職：加速器研究施設 加速器第五研究系主幹 教授

Super-KEKB, LINAC, PF/PF-ARでの重要な加速器開発項目



ラティス設計

全体設計
加速器設計・軌道理論
ビーム力学

電磁石設計製作
真空設計製作

電磁石



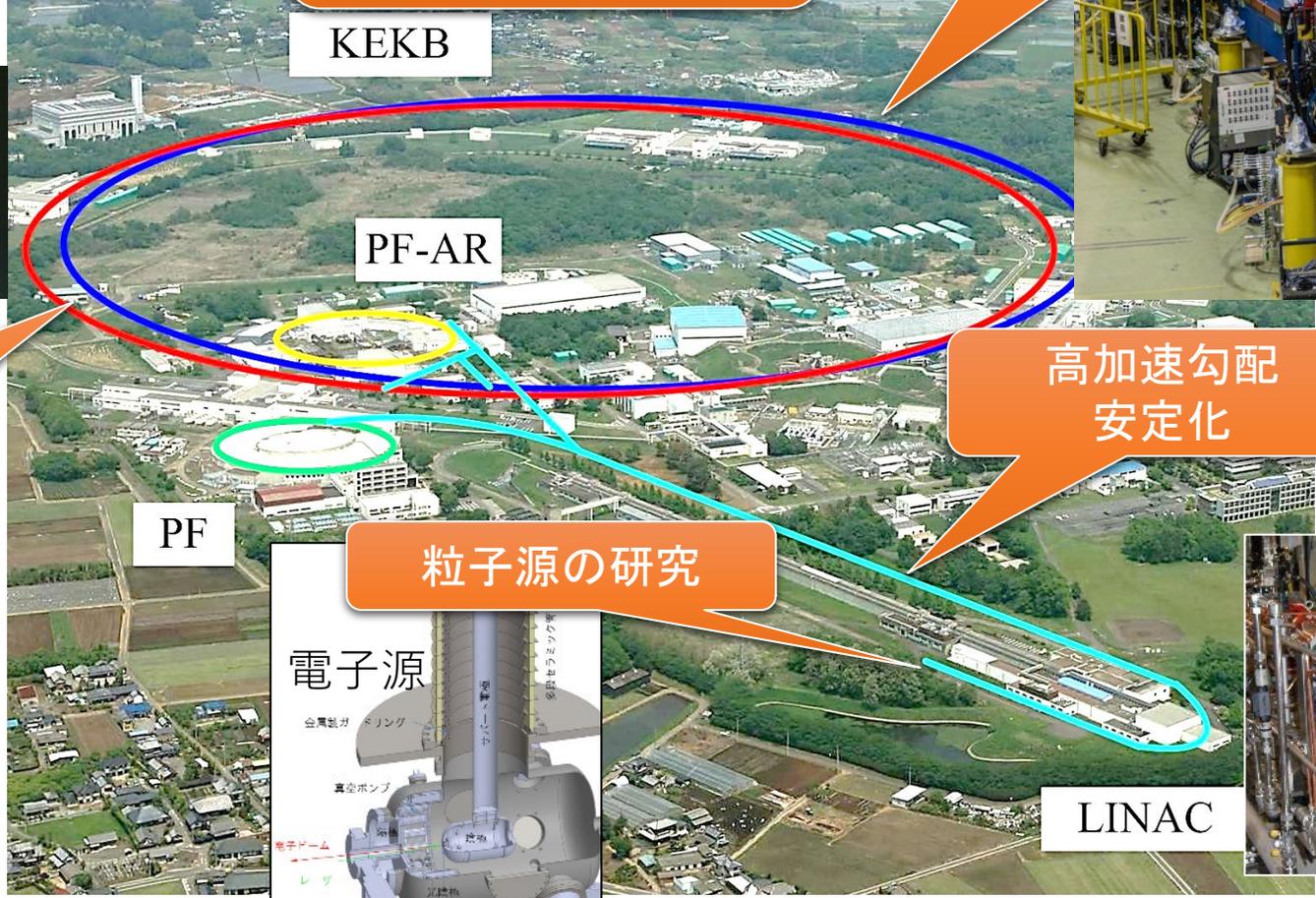
真空チャンバー

ビーム
位置モ
ニター



加速器制御・モニター
放射線遮蔽

FPGAによる
デジタル制御



KEKB

PF-AR

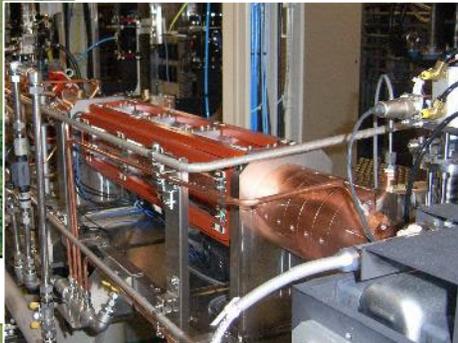
PF

LINAC



粒子源の研究

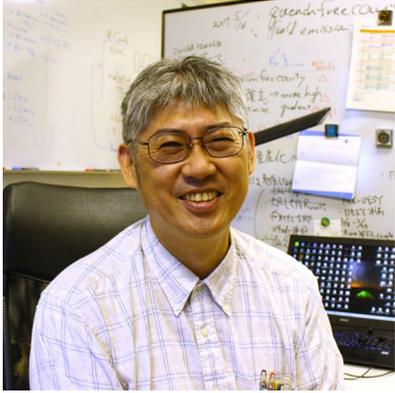
高加速勾配
安定化



加速管

加速器を作るためには、加速器の各装置（要素）について設計、製作を行う。特にKEKではその加速器の研究・開発を行う。

Innovation Center for Applied Superconducting Accelerator (iCASA)



iCASAセンター長 阪井寛志

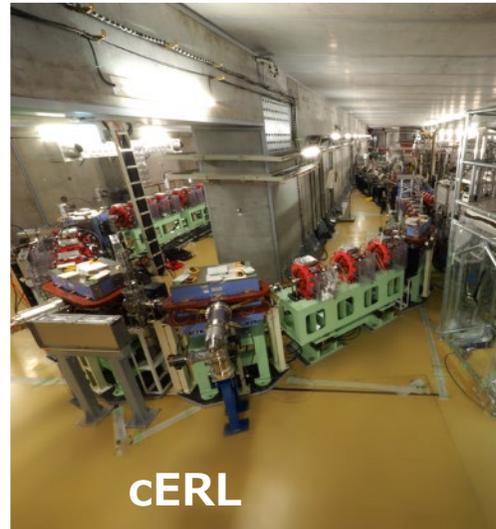
iCASA is developing a **linear collider (LC) accelerator** for particle experiments using a superconducting RF cavity, which capable of **high-intensity beam acceleration**, as well as developing **applications of superconducting accelerator technology for industrial and medical applications.**



ATF

For ILC
Positron source

And, iBNCT, etc



cERL

Applied research



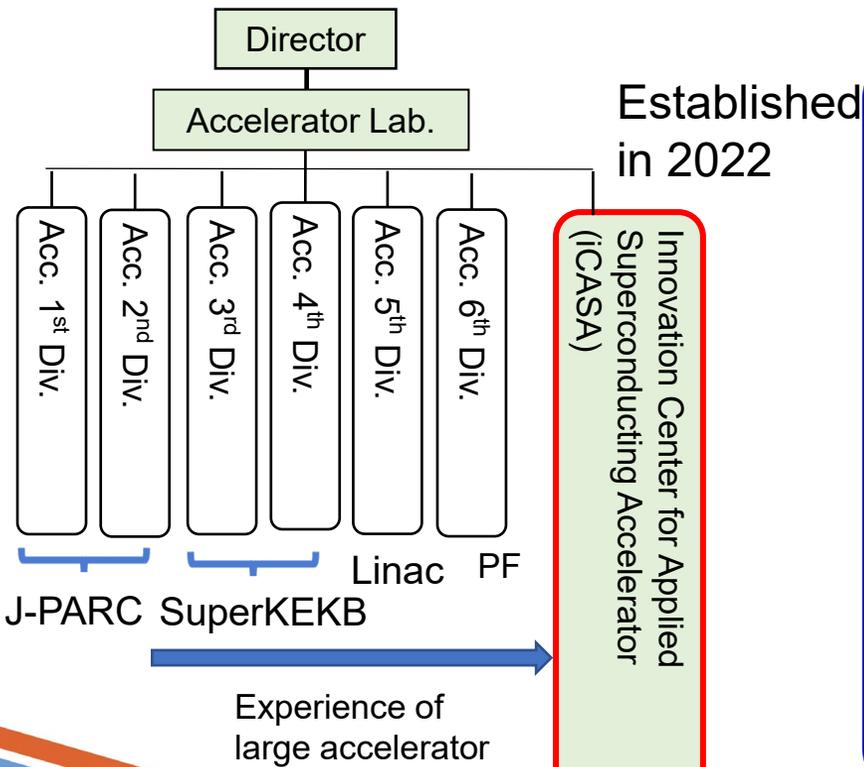
STF

For LC, cavity R&D



CFF (mechanical center)

cavity R&D

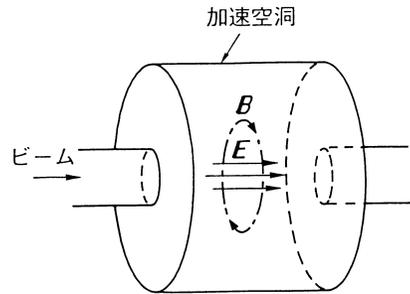
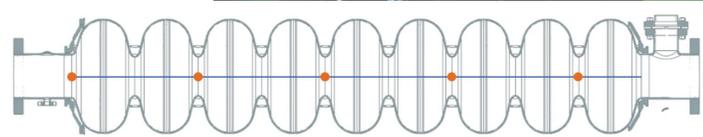
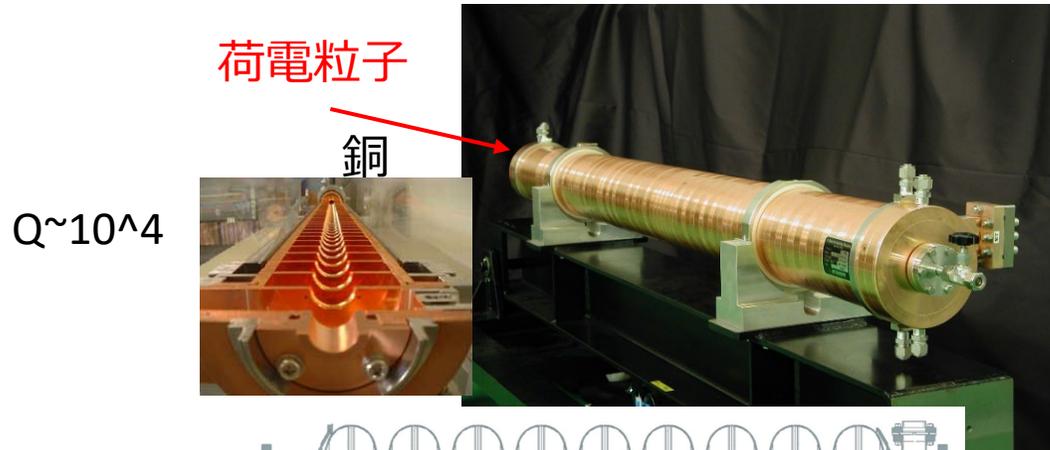


超伝導加速空洞の魅力



普通の加速空洞は銅でできている。(通常、低加速か、パルス運転。) 小電流ビーム加速

抵抗を0にすれば空洞内に大きな電場を立てることができる。省電力 (大電流連続CW加速も可能)



E: 加速電場
B: 磁場(壁電流)

壁電流が空洞壁でロスする。銅では投入パワーの約半分が壁でロス。→連続加速不可

常伝導空洞によるビーム加速イメージ



超伝導空洞によるビーム加速イメージ

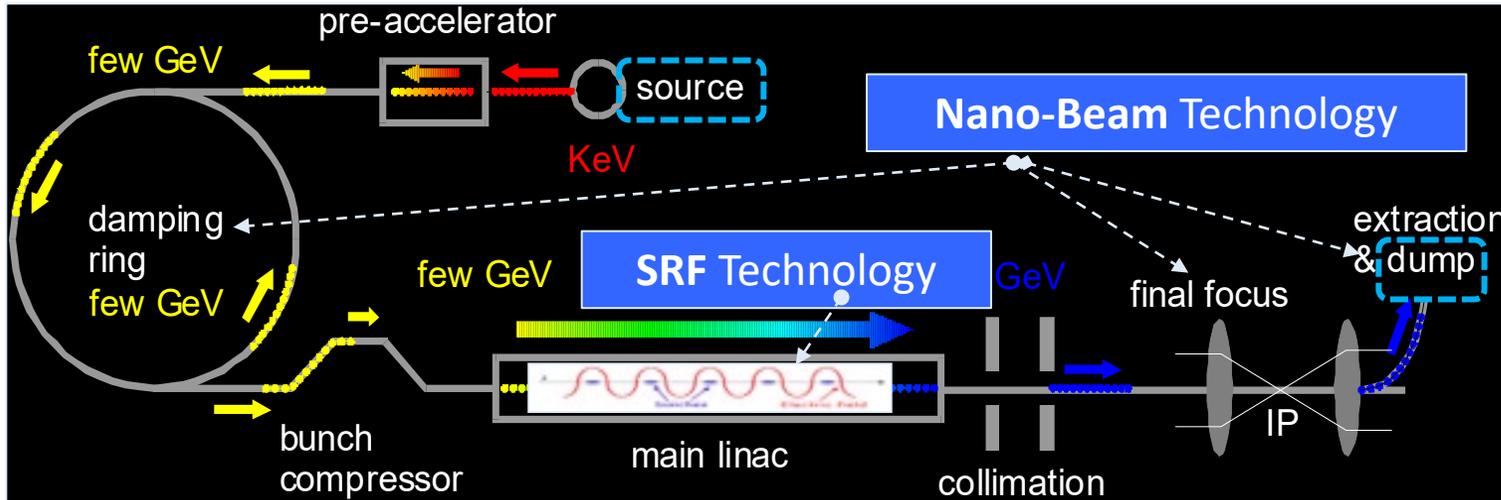
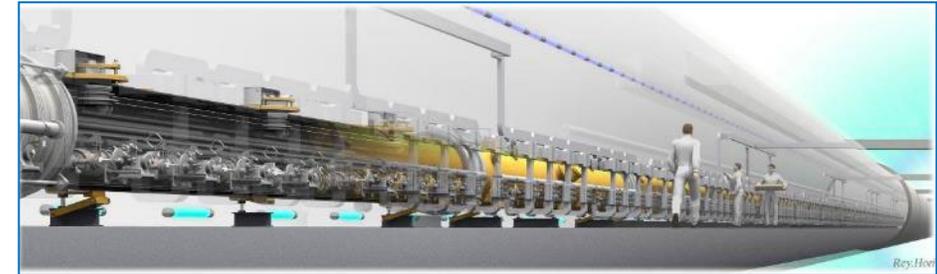
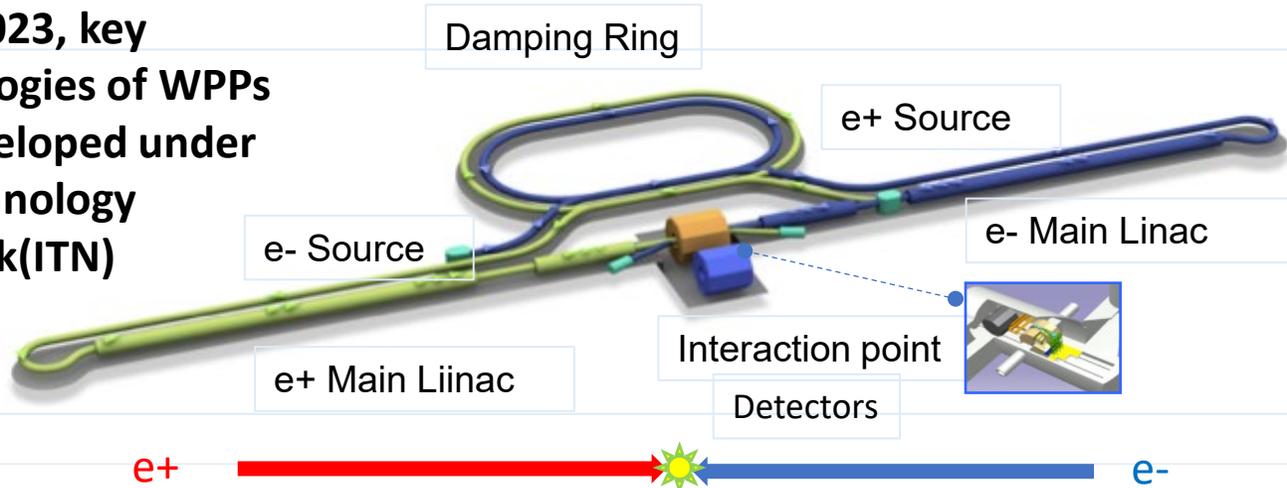
KEKで培ってきた長年の超伝導空洞技術

夢の高エネルギー大電流の加速を実現できるのが強みです。省電力小型化も可能か？

基礎研究から産業応用まで高輝度大電流ビーム、超伝導加速器技術の応用は幅広い。->本研究(iCASA)の動機

ILC and the Accelerator Technology

From 2023, key technologies of WPPs are developed under ILC Technology Network(ITN)



(ILC key technologies) done under ITN

1. SRF cavities of 9000 numbers
2. Nanobeam production and stability.
3. Huge electron and positrons production

| Parameters | Value |
|---------------------------|---|
| Beam Energy | 125 + 125 GeV |
| Luminosity | 1.35 / 2.7 x 10 ³⁴ cm ² /s |
| Beam rep. rate | 5 Hz |
| Pulse duration | 0.73 / 0.961 ms |
| # bunch / pulse | 1312 / 2625 |
| Beam Current | 5.8 / 8.8 mA |
| Beam size (y) at FF | 7.7 nm |
| SRF Field gradient | < 31.5 > MV/m (+/-20%) Q ₀ = 1x10 ¹⁰ |
| #SRF 9-cell cavities (CM) | ~ 8,000 (~ 900) |
| AC-plug Power | 111 / 138 MW |

Applications of SRF accelerator

cERL (CW and SRF accelerator) is the key to applied research on accelerators.

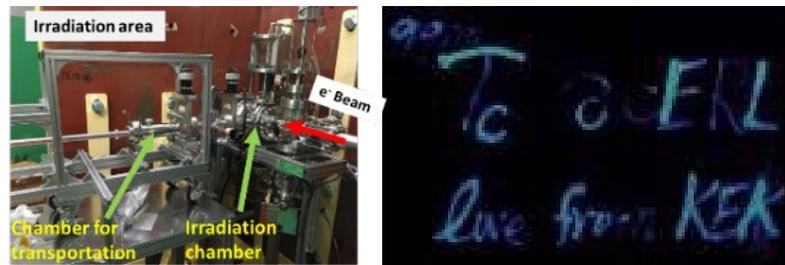
Key technologies

- **High brightness gun**
- **SRF cavity**
- **Energy recovery technique on high current beam**

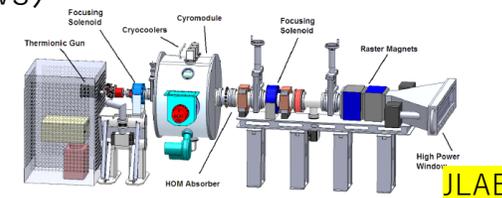


ERL based SASE-IR-FEL (NEDO)

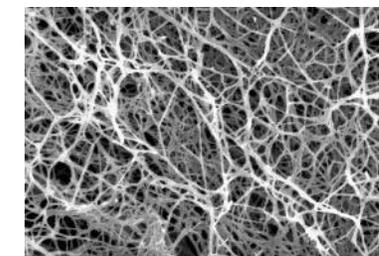
THz beam



Mo-99 (medical diagnostics) production and technetium extraction at cERL (2019.10 KEK news)



Water purification by electron beam irradiation



High efficiency and low cost of **nanocellulose** production by electron beam irradiation (collaboration with AIST).



LSI Fab

EUV light will be provided to several EUV exposure systems, simultaneously.

Facility of EUV-FEL light source (Main/Sub light source)

~10-kW EUV source by ERL based FEL (**EUV-FEL**)

Communication

FEL-EUV

Medicine

BNCT **⁹⁹Mo-^{99m}Tc**

Environment

Wastewater/Flue Gas Treatment

High Intensity

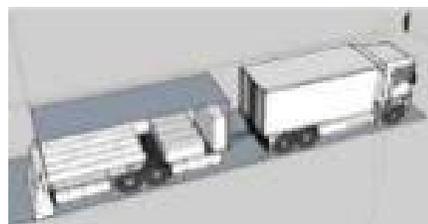
Superconducting Accelerator Technology

Infrastructure

Asphalt Tunnel Bridge

Energy

ADS IFMIF Bio



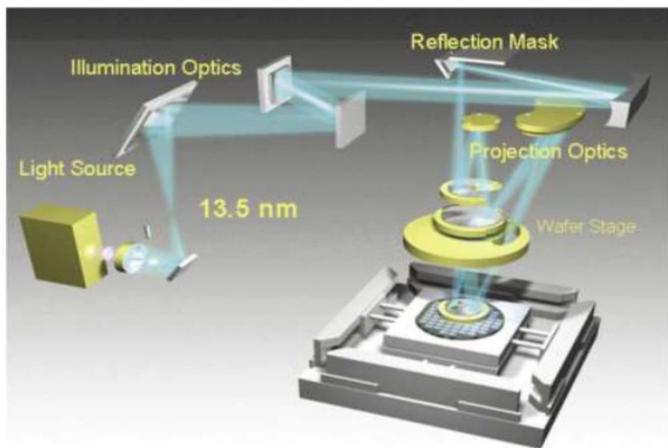
Electron beam irradiation onto **asphalt** to extend its life.

ERL技術による次世代半導体リソグラフィ光源開発



- 半導体微細加工のためのEUVリソグラフィ用大強度EUV光源開発が次の大きな課題。
- 既存のLPP(~数100W)を20倍以上凌駕する10kWレベルのEUV光源が実現可能である。
- また、LPPに比べ、エネルギー回収技術を用いることで、省電力が可能。(10kWで5MW程度)

現在のEUVリソグラフィ用LPP光源

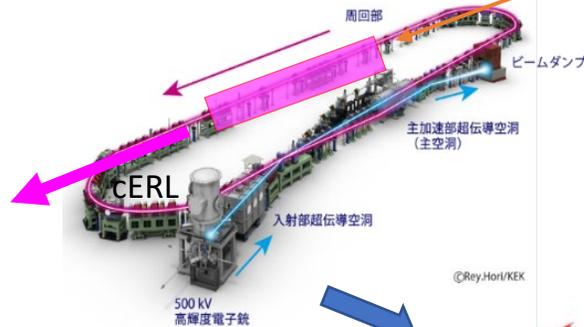


LPP(Laser Produced Plasma方式)
波長13.5nm(EUV)
→ 数100W レベル
>1kW : 技術的ブレークスルー必要

今日はこの話を本田さんに行ってもらいます。

cERLでFEL技術の開発 2021年IR-FELを実証

10mAでのERL-SASE-FEL
の実証が次の課題

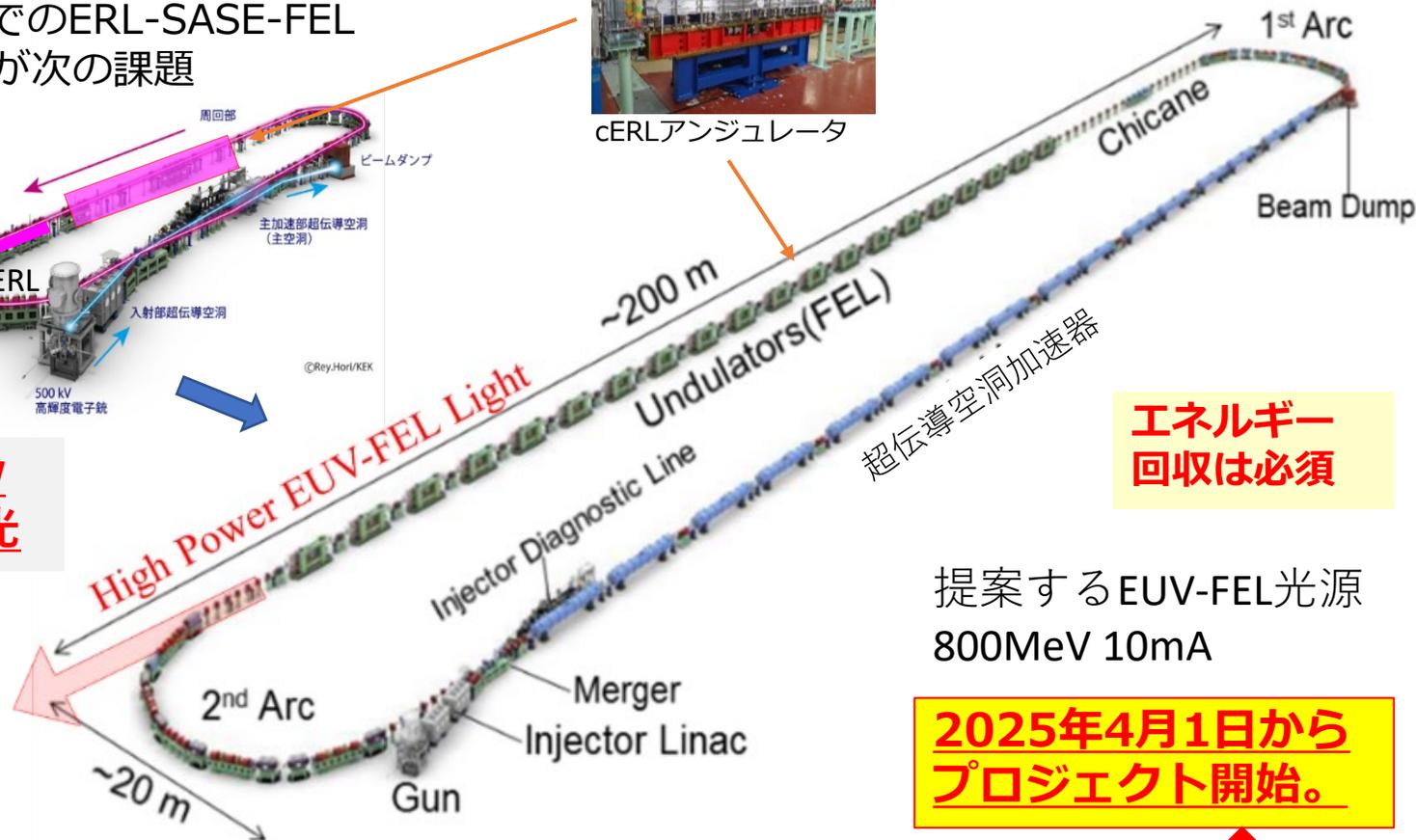


10kW
EUV光



cERLアンジュレータ

次世代EUV光源最有力候補(EUV Lithography 国際学会にて)



エネルギー
回収は必須

提案するEUV-FEL光源
800MeV 10mA

2025年4月1日から
プロジェクト開始。

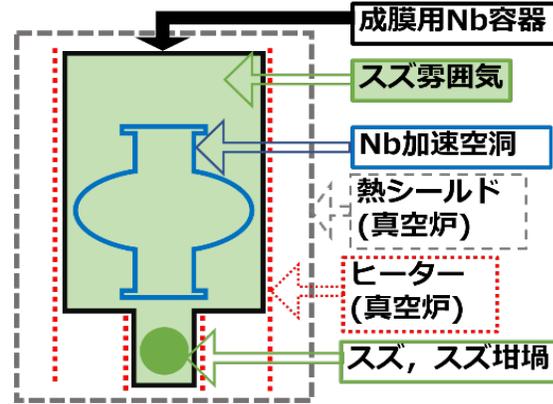
EUV-FEL実現に核となる加速器技術の課題を解決し、10kWEUV光源実現を目指す。

近年の超伝導技術 (Nb₃Sn cavity)



従来の Nb 空洞

KEKでの Nb₃Sn 空洞



Nb₃Sn cavity 蒸着でコーティング

現状として大きなヘリウムタンクが必要
→ニオブスズによって小型化できる

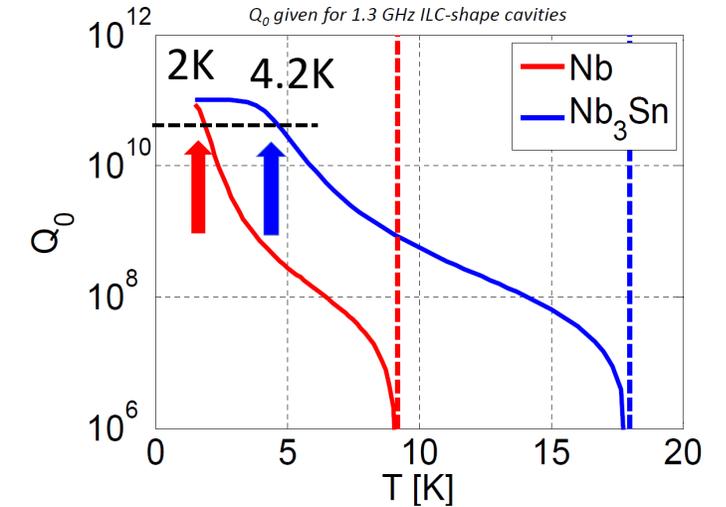
| | Nb | Nb ₃ Sn |
|------|-------|--------------------|
| 転移温度 | 9.2 K | 18 K |
| 臨界磁場 | 219mT | 425mT |

高い転移温度 → 4.2K運転可能に
 高い臨界磁場 → 高い加速勾配も可能に
 →次代の超伝導加速器にとって必須の技術になりつつある。

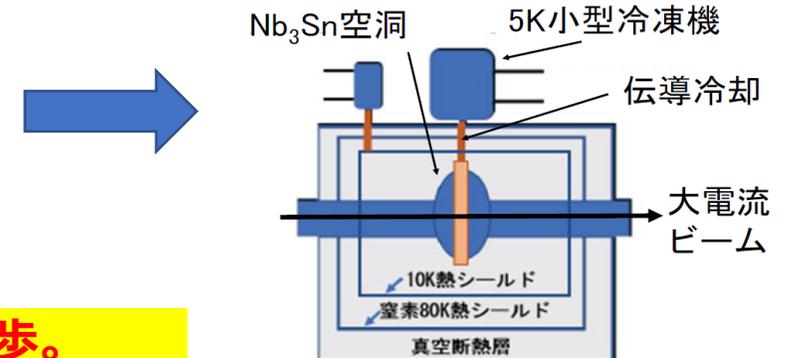
KEKのNb₃Sn用真空炉@COI



$$Q_0 \propto 1/R_s$$



Nb(2K)とNb₃Sn(4.2K)のQ値(空洞表面抵抗の逆数)が同じ。
 4.2Kで1/5以下の熱負荷に抑えることが可能。
 → **小型冷凍機による伝導冷却運転**が可能に



断熱槽の中に熱交換等の配管がなく簡素化。Heジャケットもいらず、高圧ガス対応不要。

新Nb₃Sn空洞実現は産業利用などの汎用・小型照射加速器への大きな一歩。

ここ時間あればもう少し話します。

まとめ



- 加速器は、人類の知的財産拡大と繁栄に貢献する極めて有力なものであり、**高エネルギー実験は今までこの加速器の開発でなりたっております。**
- 今回はこの加速器について、特にKEKでの加速器の現状とともに、その基礎をお話しました。**加速器に求められる性能は、基礎科学用応用を問わず、ますます高度化が求められているのが現状です。**
- KEKでは長年加速器開発を行い、素粒子実験や原子核実験、また物性実験などをJ-Parc、SuperKEKB、PF、Linacなど運転のもので行ってきました。さらに現在、KEKのiCASAではILC用の超伝導加速空洞の開発を行うとともに、cERL超伝導加速器を中心とした加速器技術の産業医療応用を進めています。

- **KEKでの加速器開発の醍醐味は世界の最先端を走る加速器開発を一から行えるところです。**
- 将来の加速器を担う開発を行っており、**右のように若い学生・研究者がKEKのみならず、色々な施設や大学からも現在参加して進めております。**

KEK総研大のPragyaさん：
本研究で2025年9月末で博士号を取得。
KEK総研大での加速器専攻の入学も受け入れてます。



KEKの加速器研究施設の公募(2026年2月17日 正午必着)

(加速器25-10 (特別助教 / 女性)) <https://www.kek.jp/ja/career/accl25-10j>

(加速器25-9 (特任助教) Kpro関係) <https://www.kek.jp/ja/career/accl25-9j>

————→ 加速器全般

————→ 次本田さん紹介

今後も加速器関係の公募があると思います。その時は連絡させていただければと思います。

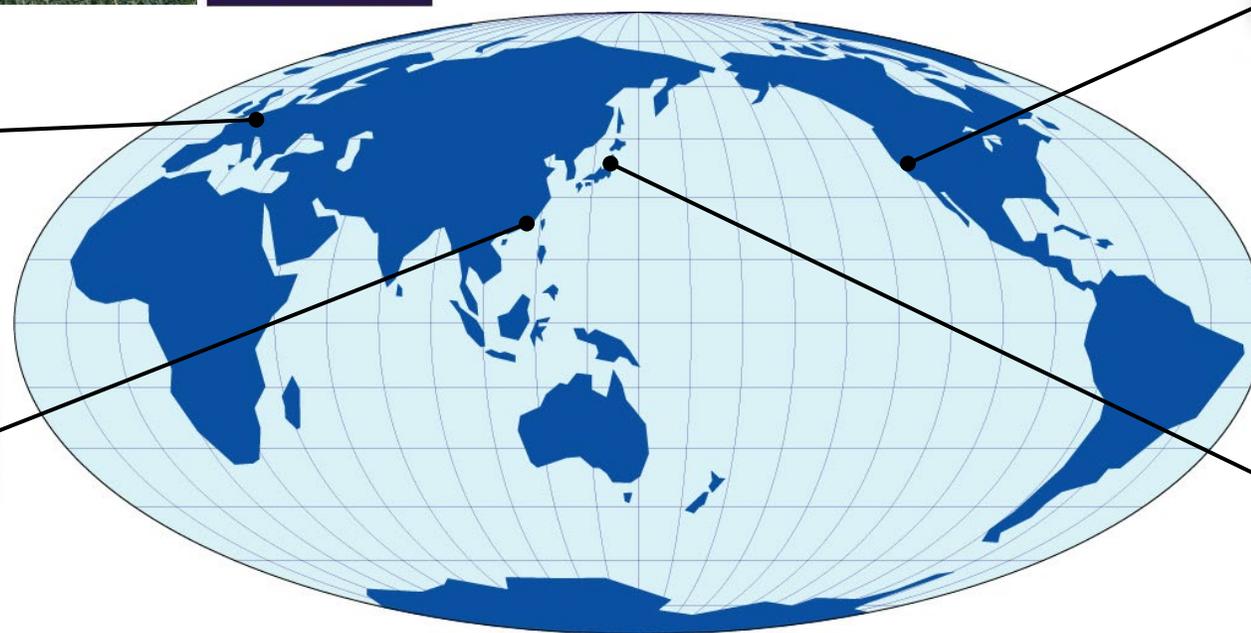
backup



学術利用を主とした世界の大規模超伝導空洞加速器(XFEL & ILC)



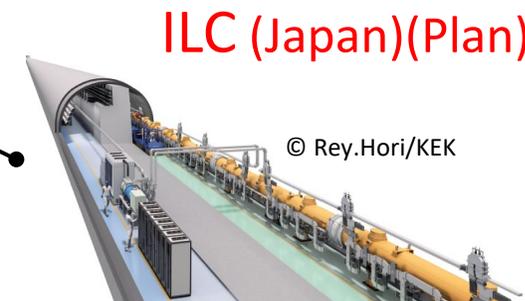
EuXFEL (Germany,EU)
Operation started from 2017



LCLS-II (U.S)
(under construction)



SHINE (China)
(under construction)



ILC (Japan)(Plan)

- 新たな窒素ドープ技術による超伝導空洞のhigh-Q化→世界的にhigh-duty (CW)加速器 (LCLS-II等)の建設が進む。
- さらに陽子・イオン加速器 (日本ではIFMIF(青森)、RIBF(和光))での超伝導空洞の応用も進んでいる。
→ 超伝導空洞を利用した加速器建設が精力的に進んでいる。

超伝導空洞開発は基礎研究だけでなく今や様々な応用研究の展開に必須。