

あらためて今回の趣旨説明と、
~~素粒子物理学の将来展望における~~
~~Higgs Factoryの位置付けと、~~
ILCの実現に向けた取り組み

(2024.10.03)

石野 雅也

東大 素粒子物理国際研究センター / ILC-Japan代表

我々はLHC加速器を使ってヒッグス粒子を発見し、その性質を詳細に測定してきたことであるが、現在までに得られた結果のすべては、**誤差の範囲で標準模型と無矛盾 (@ LHC)**である。一方、さまざまな観点で、**より高いエネルギースケールに新たな物理 (D.M., GUT, ...)**の枠組みがあること、これを実験的に解明することの価値・これを知りたいという動機は、多くの方に共有してもらえらるものと思う。

素粒子物理学を**次のステップに進めるために、Higgs Factoryを作って実験することの意義**は世界中で共有されているが、今回あらためて、その意味を共有するところから始めたいと思います。

また、我々 (**ILC-Japan**) は、**ILCというGlobal Projectを推進**し、研究の輪を拡大していきたいと思っています。**加速器・物理・測定器の研究、それぞれの観点で魅力的な研究テーマがある**ことや、それらの現在状況を紹介して、まずは**広く知っていただく**ことを1つの目標にしています。

こちらからの出し物の時間は短めにして、**現地で対話しながら互いの理解を深められると理想的**であると思っています。当日、さまざまな議論ができることを楽しみにしています。

30 - 50年の時間スケールで、素粒子物理学を良い形で展開・発展させたい...

と考えた時、Higgs Factory (or ILC) という基幹プロジェクトの存在意義?

どんな風に関わりたいか? 考えるきっかけになると良い

将来計画委員会 2017

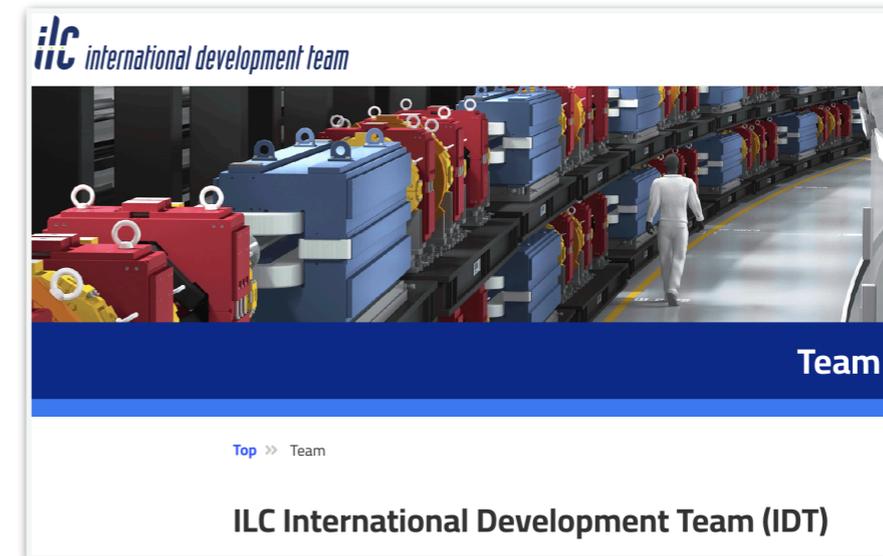
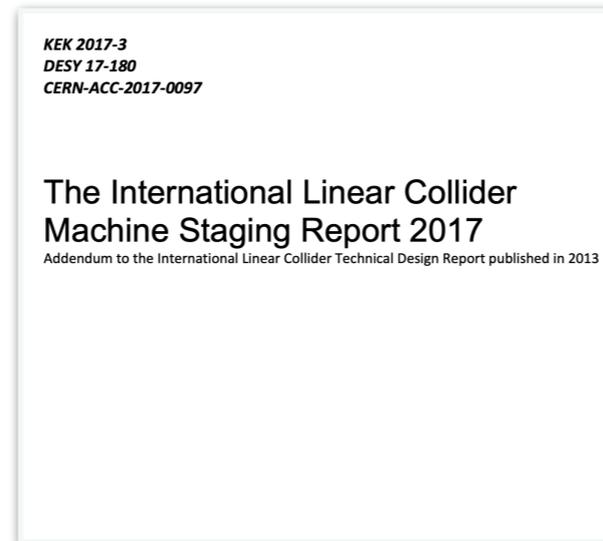
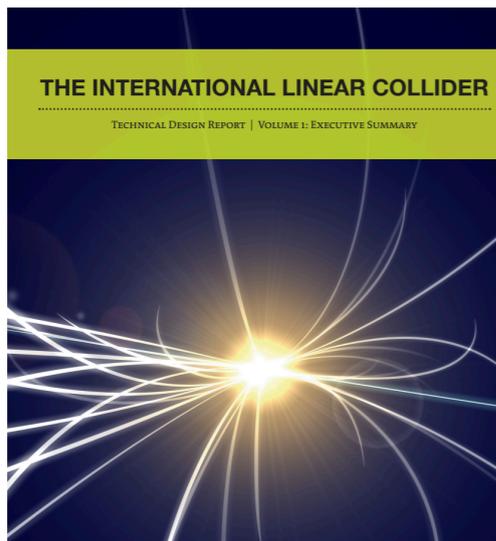
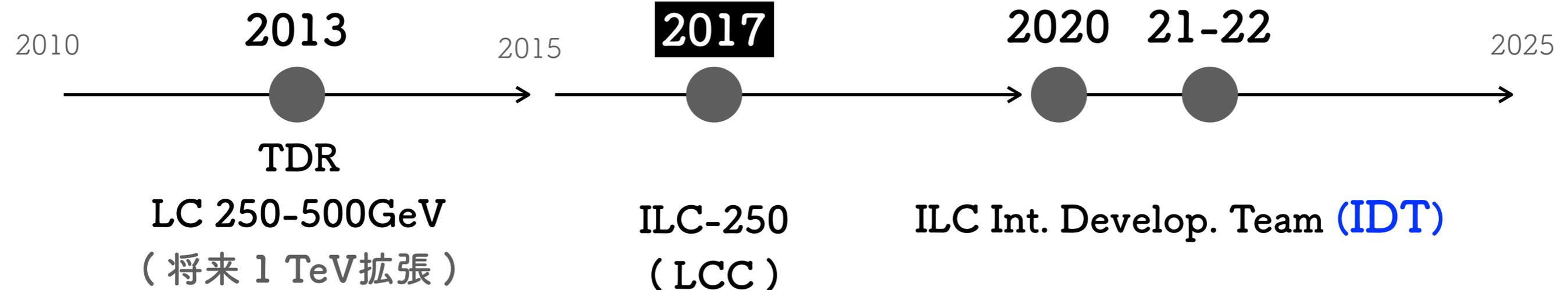
→ ILC250・日本国内・早期実現

ILC250物理意義の検証委員会

→ Beyond SMの方向性を定め得る

IDTによる「Pre-Lab提案」

→ Pre-Lab移行は時期尚早
(2nd. 有識者会議)



日本に建設するILCのための、
ILC Pre-Lab の準備 (国際的研究者)

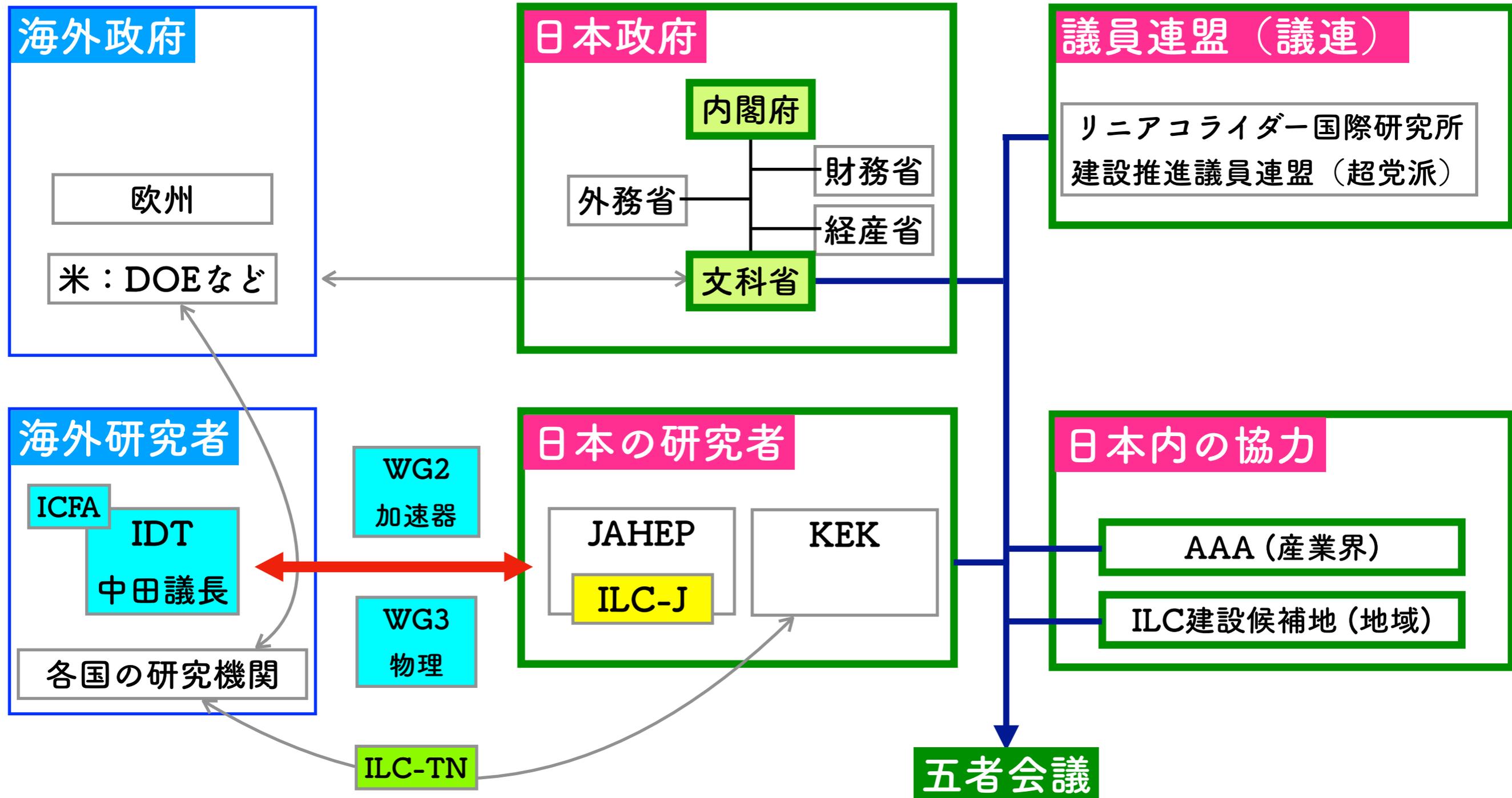
- 素粒子分野の振興を期待。ヒッグス粒子の精密測定がもつ学術的な意義は認められる。
- ILC 計画の今後の見通しを明確にするような大きな進展は見られない
 - 不足 (ILC) : 国際的な研究協力と **費用分担の見通し**、国民/科学コミュニティーの広い支持
 - 不足 (広域) : 分野の将来について **国際的に統一された提案/ロードマップ**
 - ➔ 日本政府がILC誘致の関心表明を前提とした **ILC 準備研究所への移行は時期尚早**

上記の「不足」を埋めるための、具体的なアクション

- 費用分担の議論が進まない原因の1つ、**立地問題を一旦切り離せ**
 - ➔ **Global Projectに立ち戻る**
- ITERなど、過去のGlobal Projectに学べ
 - ➔ IDTの元に設置された**国際有識者会議 (IEP)で分析**
- 次世代加速器の開発に重要な技術課題に対して、国際的に連携して取り組む必要
 - ➔ **ILC Technology Network**
- 国内外のステークホルダーとの関係構築
 - ➔ **ILC-Japan / KEK ILC推進**

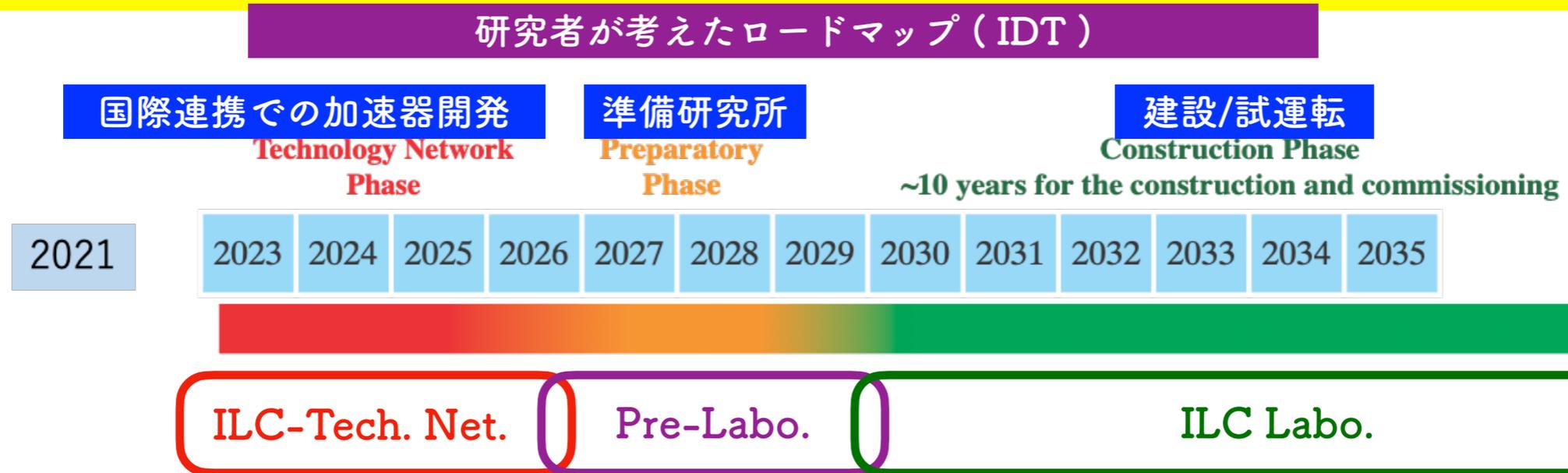


WG/TF: 従来からILCの方、 普段はATLAS or Belle II or 他の実験を主にやっているが、
 将来 HFがスコープに入る世代の方々の参加を得て、研究活動/プロジェクト推進活動をしています



Global ProjectとしてILCの実現に関心を持つ
 国内外の研究者/政府間の理解・議論のもとプロジェクトを推進する

実現に向けた段取りのタイムライン



[Step-1] パートナー国が集まって Global Projectの形 を議論/決定する

- ILCの建設に関心を持つ世界の**研究者/政府**は、これをGlobalプロジェクトとして進めるための議論をする
- **費用分担ルール**、責任分担ルール、推進組織の形態、**サイトの決定方法**、etc. **ルールを決める**
立地問題切り離し

[Step-2] [1] のルールに従い 具体的なILCの形 を議論し、決定していく

世界の研究者+政府は、Global Projectとして、どんなILCを作るか、どこがホストするか、議論する

(a) 日本政府は、ILC250をホストすることへの関心を表明する

(b) Europeは、例えば、最初から長いトンネルを掘って、既存技術で 250 > 380 > 500 GeV提案... とか
ここで、色々出てきて、本気の競争をするのは"良いこと"

[Step-3] [2] が進めば次に進む → **準備研究所の開始** ILCの建設に向けて、さらに議論/決定、推進する

Global project:

費用分担、責任の分担、組織形態、サイトの決定など、プロジェクトのあらゆる面について、パートナー国が議論し、ルールを決める。その上で、**Global Project**として進める。

(例：ITER、SKA 身近なところでは ATLAS/CMS実験)

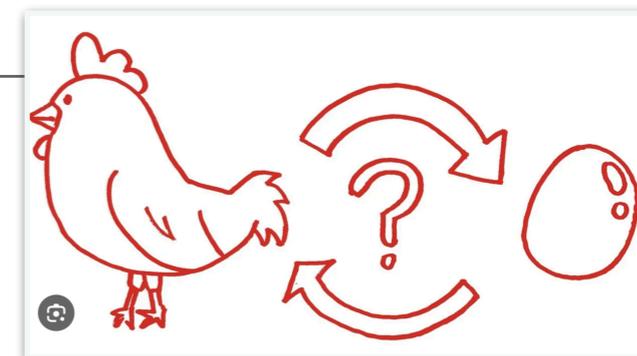
International Project :

(わかりやすい) (高額プロジェクトでの困難)

LHC, HERA, FCC ホストが最初から定義されてプロジェクトをリード。 費用 ~90% はホスト

準備研究所の提案が認められなかった (2021/2022) ことを受けて

国際有識者会議による分析



日本政府： ILCは "**Global Project**" と認識。研究者間の国際的なコンセンサスを早く確立せよ

世界のパートナー： 日本（政府）が誘致を表明しないと、始まらない (各国、いろいろな温度)

これを解きほぐすために必要なアプローチ

それよりも何よりも、**次の加速器、その次の加速器をタイムリーに作っていくためには、**

このタイミングで、新しい加速器建設の枠組みが必要

素粒子物理学における次の基幹計画

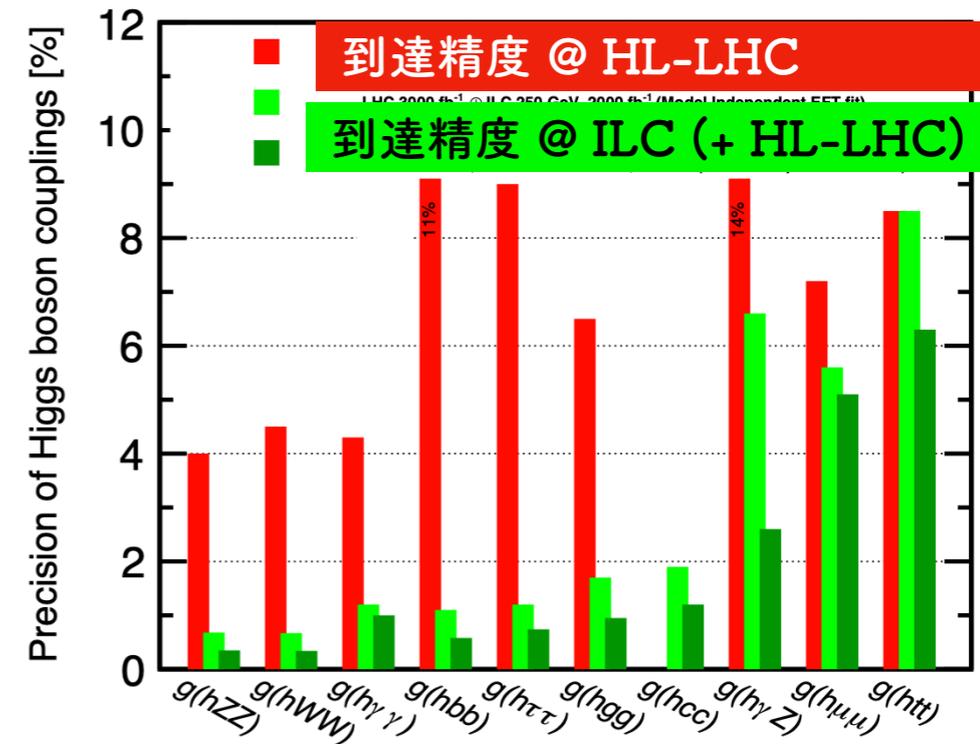
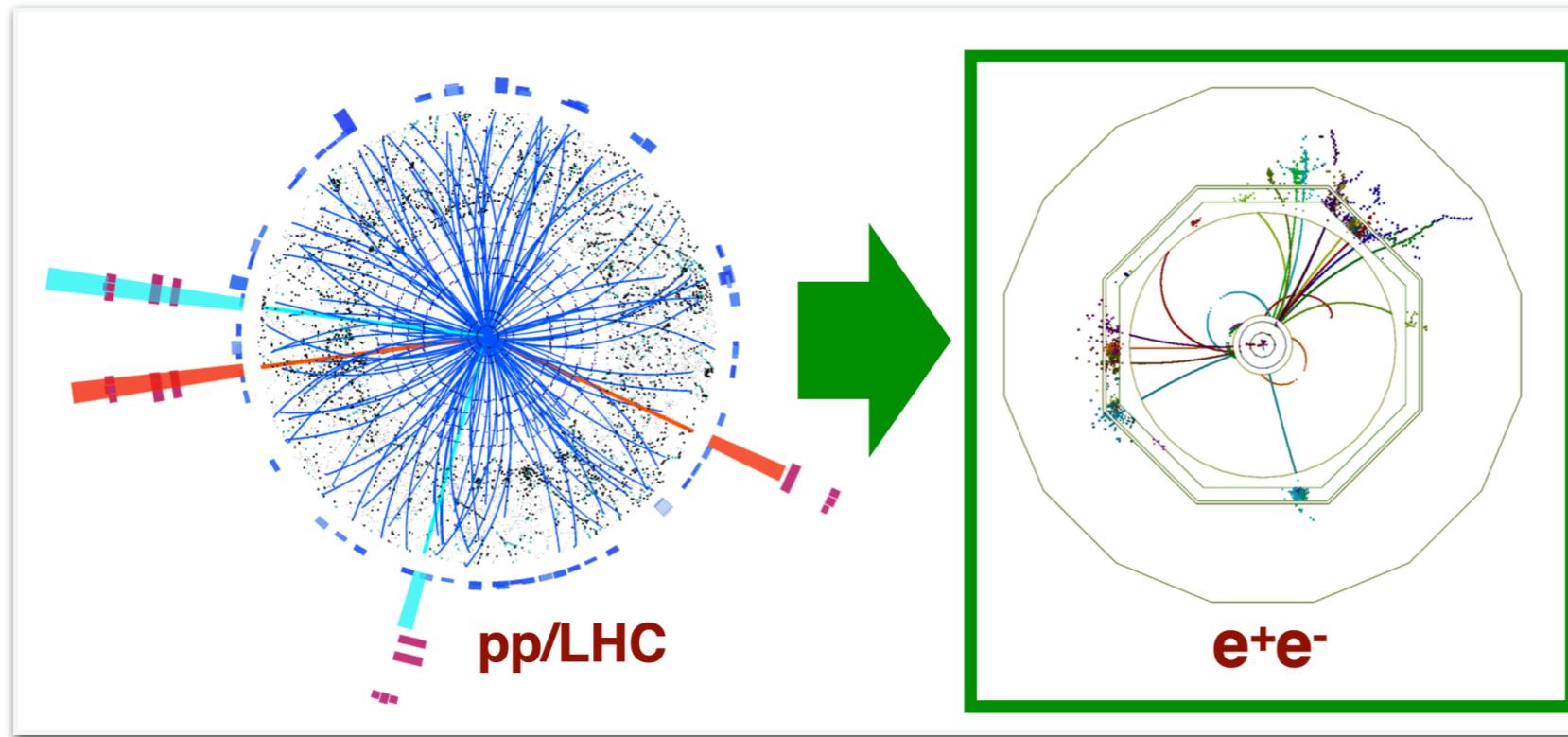
- Higgs Factoryとその意義
- 3つのプロポーザル と ILCの位置付け（アドバンテージ）
- LCのアドバンテージ、i.e. Energy拡張性を含めたコヒーレントなシナリオ構築

ILCプロジェクトの実現に向けた取り組み

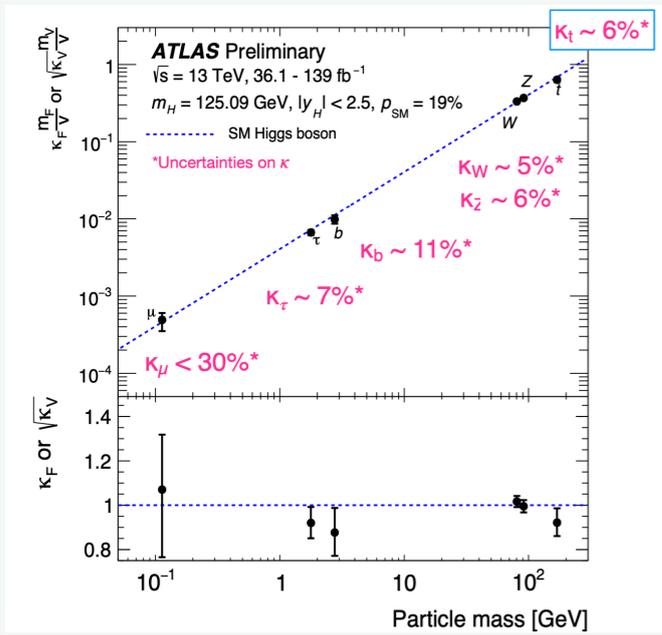
- 歴史のふりかえり ▶ 2nd. 有識者会議 (2021-22)で指摘されたポイント
- それを受けた、現在のプロジェクト進め方
 - Global Projectとして、ILCを段階的に推進する
 - ILCの実現可能性を高める。同時に、将来に渡り大規模加速器を作る枠の構築
- ILC Technology Networkという枠で、国際協力で加速器開発を推進している

「Higgs粒子の精密測定は、新しい物理の扉を開く」

その実現には、Higgs Factory (e⁺e⁻コライダー) が必要



Higgsと素粒子の結合強さ測定 @ LHC



Higgs真空は (標準模型で仮定している通り) 質量だけを見ているのか?

素粒子の持つ別の性質を感じて結合強さを変化させていないか?

- up v.s. downタイプ
- クォーク v.s. レプトン
- 第2世代 v.s. 第3世代

e⁺e⁻コライダーを使って Higgs粒子の性質を精密に測定する (HL-LHCで到達できない世界)

$$\kappa = g_X / g_X^{SM} = 1 + \Delta\kappa$$

$$\Delta\kappa \sim O(v^2/\Lambda^2)$$

例えば、1TeVに新物理 → ~6%のズレとして表出

この差異を捉えて、新しい物理の正体を察するには、HFが必要

[A] e⁺e⁻ Higgs Factory → [B] Energy Frontierへ

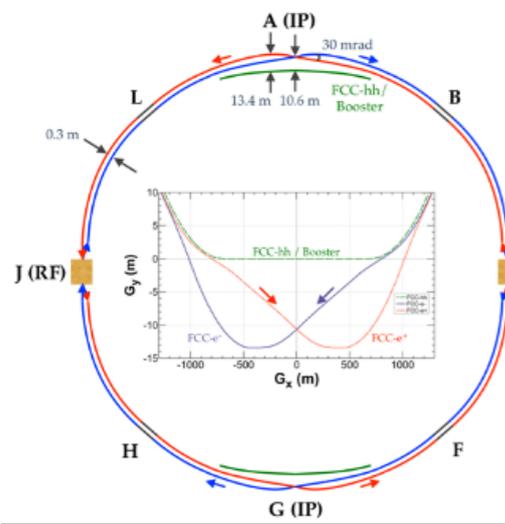
理想形

[A] Higgs粒子の精密測定により **次の新物理のエネルギースケール** を知る
→ **Higgs Factory** でやる

精密測定

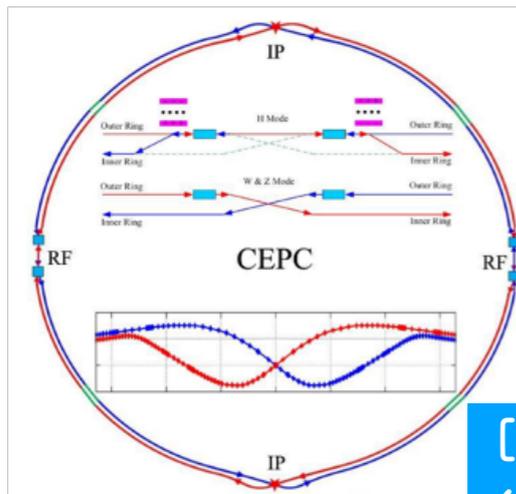
[B] [A] の科学的結果 & **その時点での最良の加速器技術** で 次の加速器を作り、
Energy Frontierで、素粒子/宇宙の「なぜ？」を解明していく

Energy Frontier



FCC-ee
(CERN)

- 円形加速器 (周長90km)
- 高いルミノシティ
- 陽子・陽子への拡張性
- × 建設コスト高 (2兆円以上)
- × 運転コスト高 (300 MW)

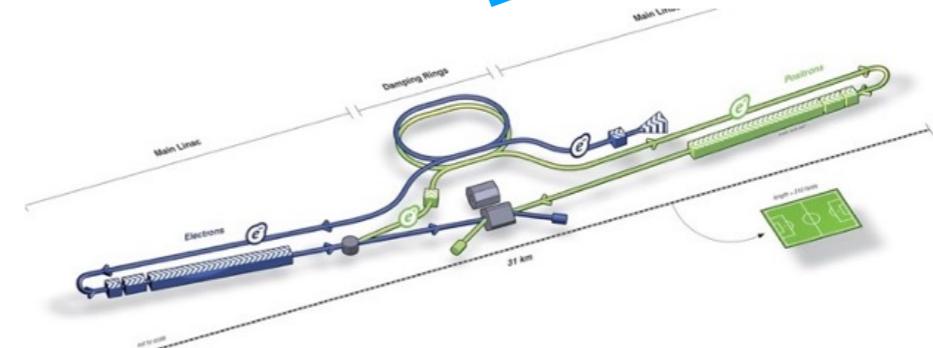


CEPC
(中国)

円形加速器 (周長100km)

[B] $\sqrt{s} \sim 100$ TeV p-p衝突
(16T磁石を開発できれば)

ILC 250



- 直線 20km
- 建設コスト 半分 (以下)
- 運転コスト 低 (120 MW)
- △ 衝突点の数 (普通は1点。2点作れるがコスト上がる)
- △ ルミノシティ (精密測定は十分可能)

ILCに特徴的なアドバンテージ

- [A] の科学的結果をふまえて
- [B] 期間の 技術革新 (衝突エネルギー & 輝度) 導入

➡ 総合的にリーズナブルな形で [B] へ進める

WP-prime 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定

目標 (モジュール)
 8空洞入りモジュール
 加速勾配: 31.5MV/m
 Q値: $<1 \times 10^{10}$

Rey.Hori/KEK

WP-prime 1: 空洞量産実証

目標 (空洞単体テスト)
 冷凍機則に則った9セル空洞で
 加速勾配: 35MV/m
 Q値: $\sim 1 \times 10^{10}$

目標
 SLCやS-KEKB
 を超える大量の
 陽電子生成技術
 確立

陽電子源

WP-prime 8~10: 陽電子源開発

WP-prime 15: 最終収束系

目標:
 ATF-FFで垂直方向
 37nmを安定にkeep。

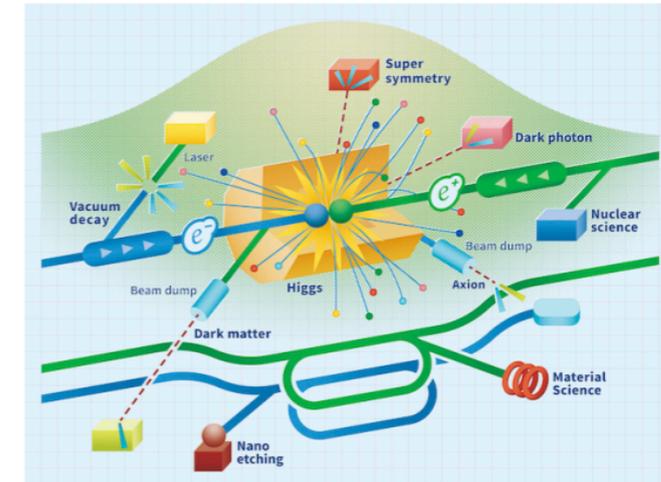


- ILCで必要とされる技術に関して、Showstopperは存在しない
- 一方、量産開始までに必要とされる技術を、よりマチュアにしておくべき時期
- 国際的に密接な関係を取りながら、研究プログラムを進める経験も重要

LC Vision Group

@ LCWS2024

Welcome to the Open Discussion: A Global Vision for a Linear Collider Facility!



LCWS 2024
 Tokyo University
 July 8, 2024

H.Sakai

LC Vision Team: T. Barklow, T. Behnke, M. Demarteau, A. Faus-Golfe, B. Foster, M. Hogan, M. Ishino, D. Jeans, B. List, J. List, V. Litvinenko, S. Michizono, T. Nakada, E. Nanni, M. Nojiri, M. Peskin, R. Patterson, R. Pöschl, A. Robson, D. Schulte, S. Stapnes, T. Suehara, C. Vernieri, M. Wenskat, J. Zhang

[A] 超伝導加速空洞 (sRF) を使った Higgs Factory (精密測定)

これをクイックに実現する

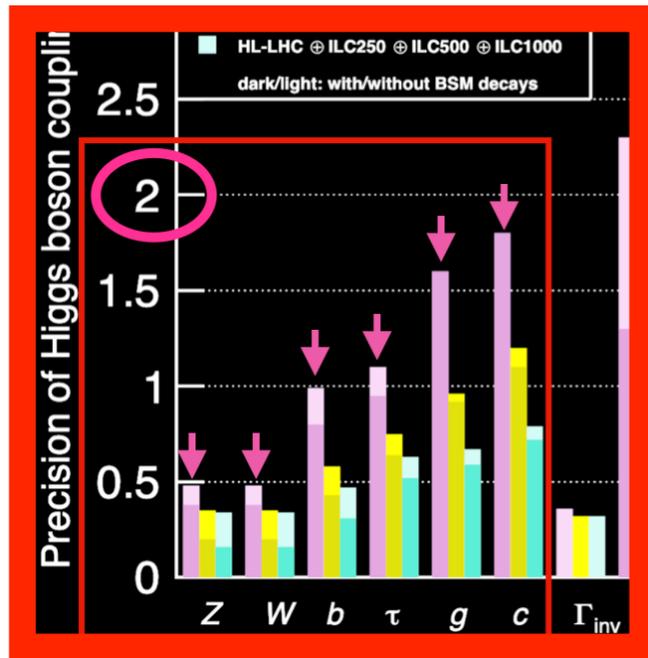
[B] High Energy and/or High Luminosityに向けた研究 (Energy Frontier)

各プロジェクトの推進者 (ILC, CLIC, C3, Traveling Wave, ERL, ...) がバラバラに活動するのではなく、

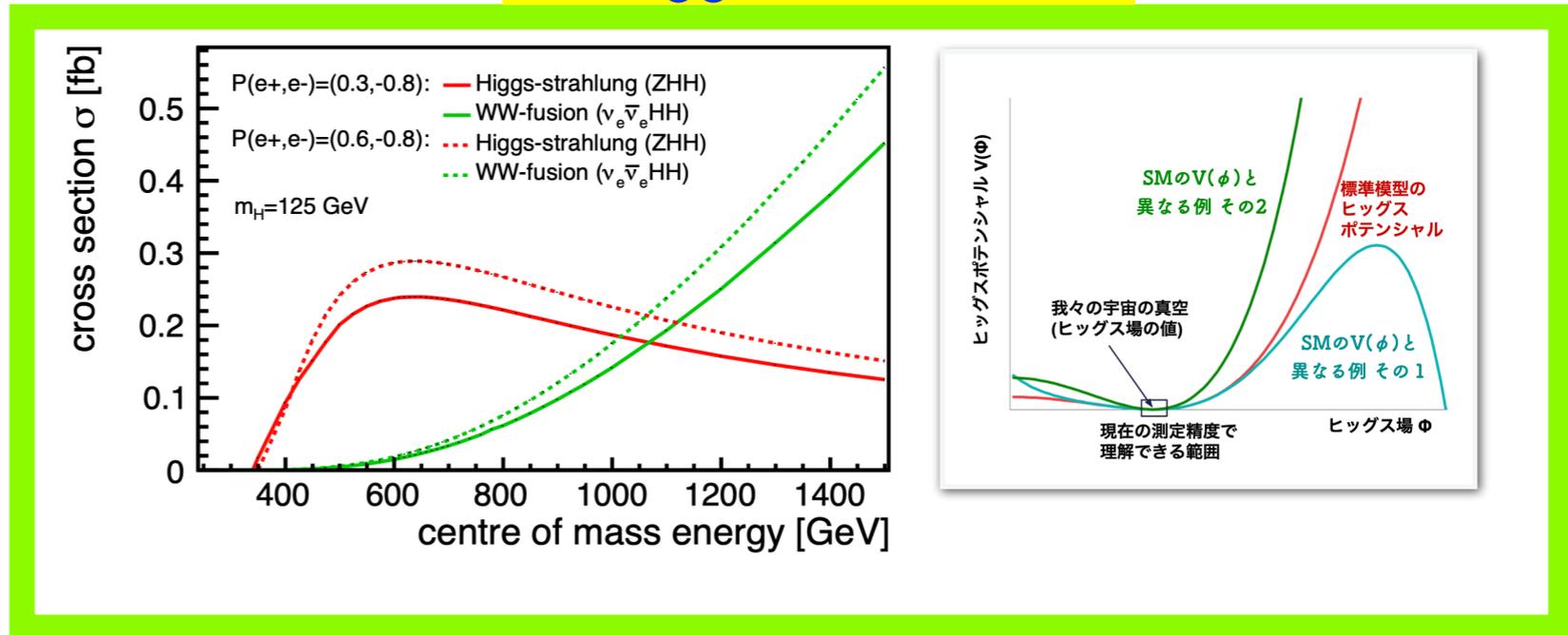
[A] → [B] の流れを共有して、"Higgsから multi-TeVまでの物理"・"次世代の加速器開発" を

コヒーレントに考える / 素粒子物業界に見せていく → 欧州戦略へのインプット (の1つ)

Higgs Coupling



Higgs の自己結合



250 GeV

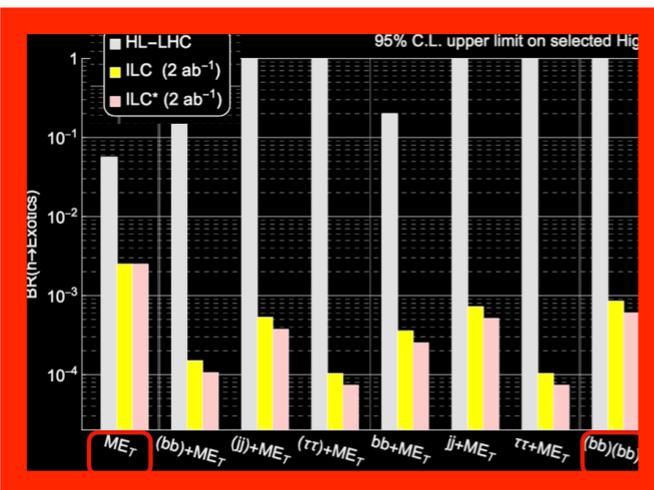
380 GeV

550 GeV >>> 1000 GeV? >>> multi-TeV?

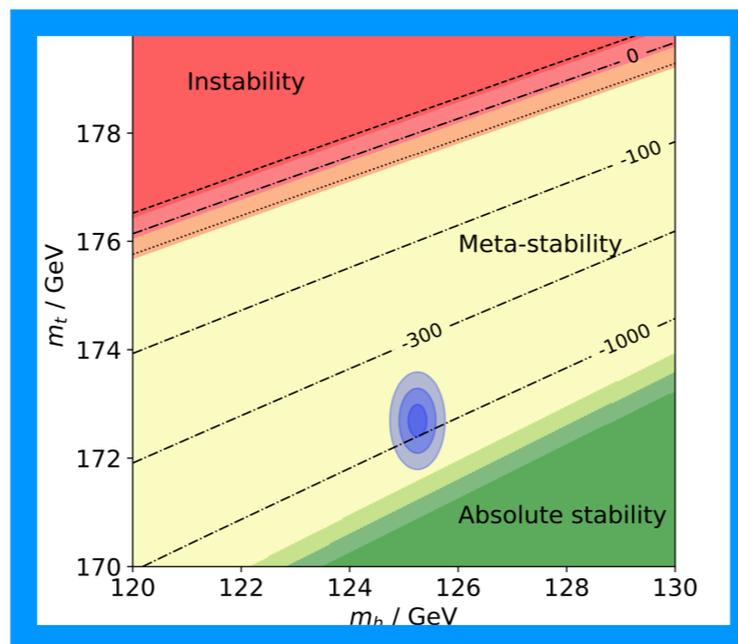
超伝導RFによる ILC

HF後の新技術によるEnergy拡張

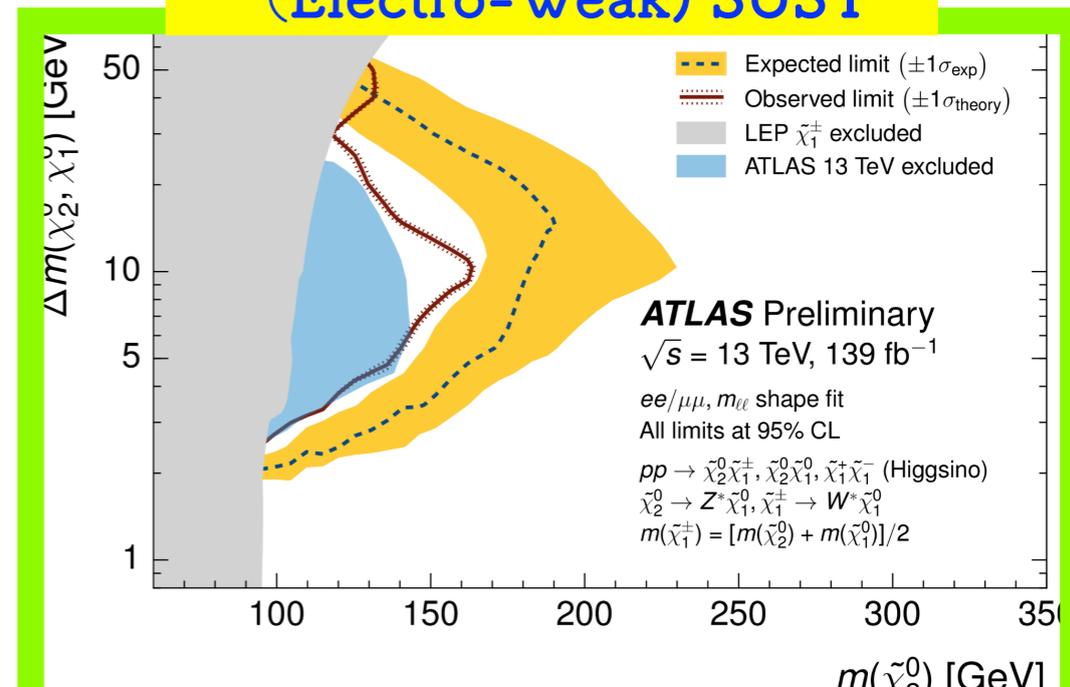
Higgs Exotic Decay



top mass >> Vac.安定性



(Electro-Weak) SUSY

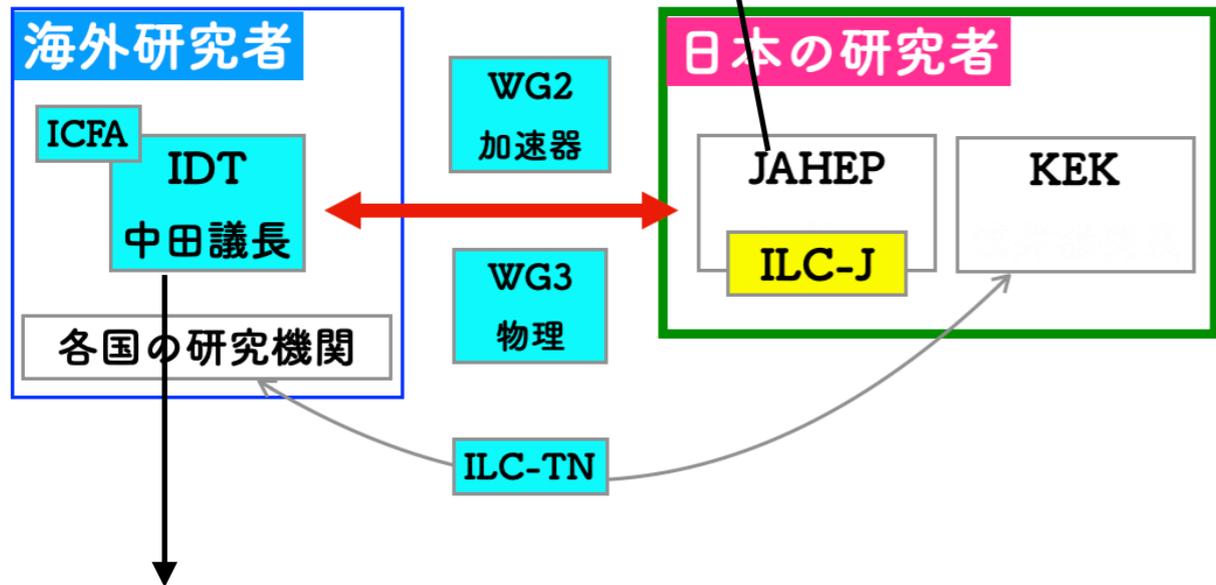


内容にILCが含まれるもの

JAHEP



JAHEPが取り組む全体のプロジェクトを含むが、少なくとも
Higgs Factoryへの取り組みについてアップデートされたもの



IDT

- ILC Technology Networkにおける進捗
- ILC建設コストに関するアップデート
- 国際有識者会議による答申の内容

• 日本のコミュニティの ILCへの取り組み方

LC Vision Group



HFから multi-TeVまでの
ロードマップ
物理・技術の整理



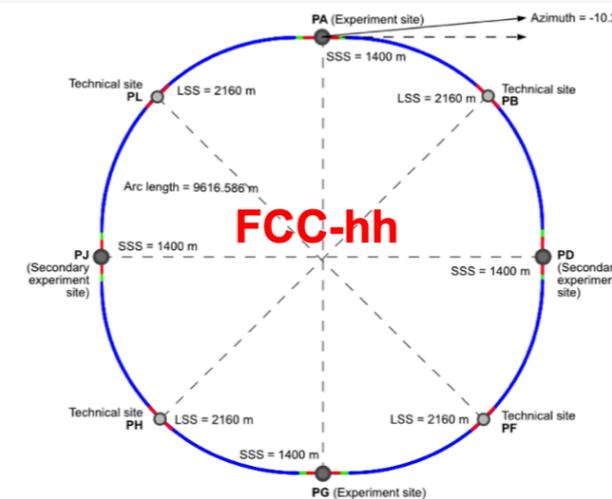
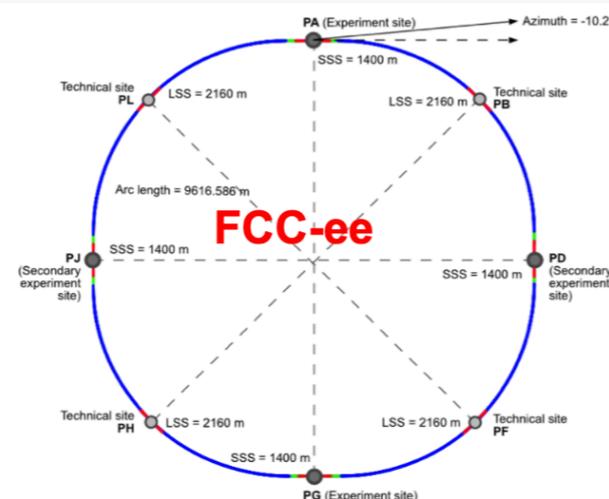
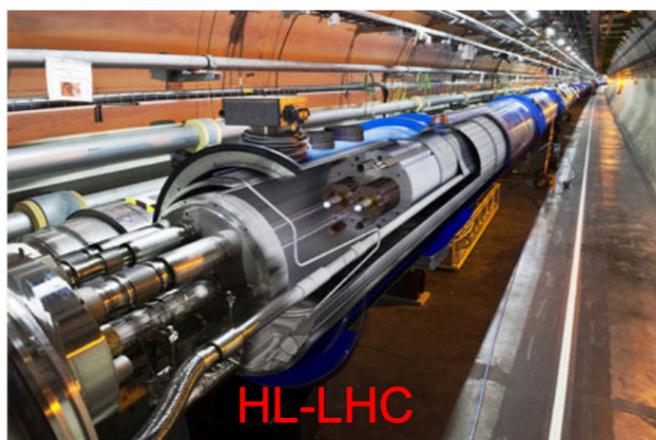
ILC@CERN

2020年：European Strategy (ES：欧州戦略)

CERNがホストする International Projectとして FCCの技術的・財政的実現可能性を調査する

- 第1段階： 電子・陽電子衝突型のヒッグス・Z/W ファクトリー **FCC-ee**
- 第2段階： 重心エネルギー100TeV（以上）の陽子-陽子衝突実験 **FCC-hh**

FCC-Feasibility Study



2029 - 2041

2048 - 2063

2074 -

FCC-Feasibility Study

ドラフトの公開

ES：欧州戦略の確定（研究者）

CERNの将来計画の確定

(CERN Council)

ES：研究者インプット

ES：ドラフト(公表?)

ES：議論



これに向けた準備 (ILC)： JAHEP将来計画委員会 (National Input) と **IDT** と **LC Vision**

(後述)

(後述)

2012.9 CEPC proposed 2015.3 Pre-CDR 2018.11 CDR **2023.10 TDR** 2025 CEPC Proposal 2027 EDR 15th five year plan Start of construction

CEPC EDR Phase General Goal: 2024-2027

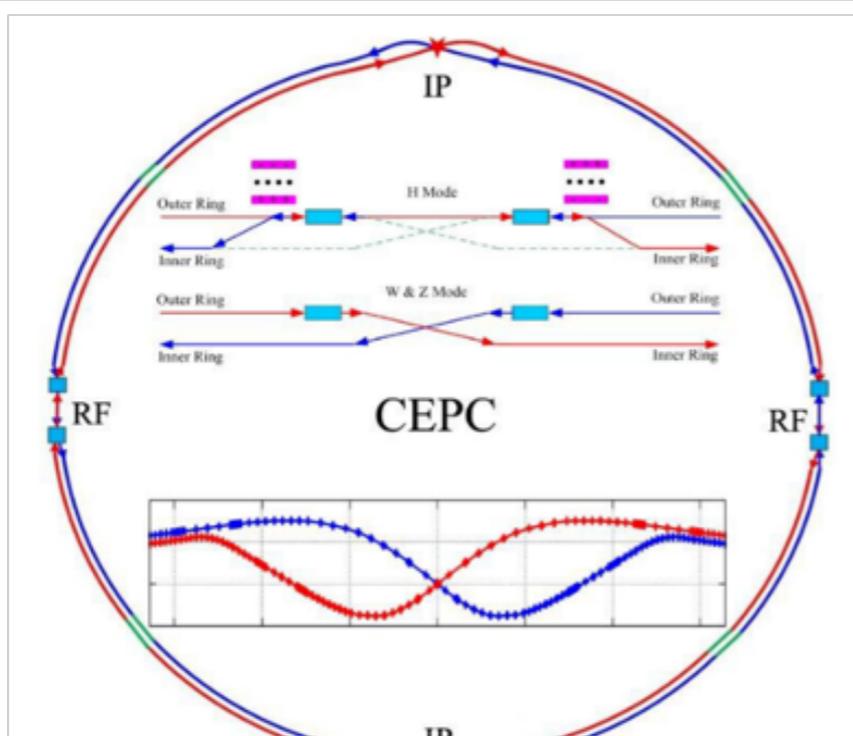
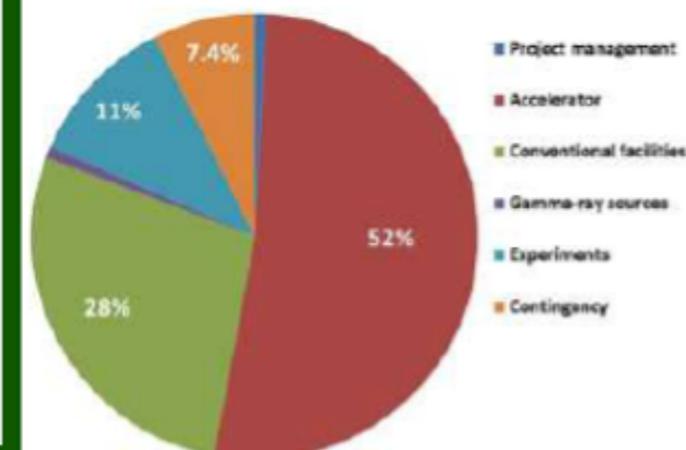


Table 12.1.2: CEPC project cost breakdown (Unit: 100,000,000 yuan)

Category	Value	Percentage
Total	364	100%
Project management	3	0.8%
Accelerator	190	52%
Conventional facilities	101	28%
Gamma-ray beam lines	3	0.8%
Experiments	40	11%
Contingency (8%)	27	7.4%



2023年 10月 TDR完成

2025年 アカデミーの決定

2027年頃 建設開始

中国科学アカデミー 15次5ヵ年計画 (2026-2030)

- 科学技術基本計画として、大型計画を選定中
- 5ヵ年計画にどれを入れるか? (順序づけ)
(科学技術8グループのうちの1つが、素粒子・原子核)

自国予算で加速器建設

JAHEP将来計画委員会答申 (2017)

>> to be updated in (2025) /2026 (CFP/JAHEP)

2012年、LHCにおいて質量125 GeVのヒッグス粒子が発見され、3世代ニュートリノ混合が確立された。この期を捉え、本委員会は日本の高エネルギー物理学の基幹となる大規模将来計画に関して、以下の提言をする。

- LHCにおいて質量125 GeVのヒッグス粒子が発見された今、ヒッグス粒子の詳細研究によって標準モデルを超える物理の方向性を示すべく、衝突エネルギーを250 GeVとする国際リニアコライダー (ILC) の日本国内での建設をただちに開始すべきである。並行して、LHCおよびそのアップグレードによる新物理の探究を間断なく続けるべきである。

+ Hyper-Kamiokaの早期実現

ILC250・日本国内・早期実現

(同時期)

ILC250における物理意義の検証

→ Beyond SMの方向性を定め得る

European Strategy 2020 (ES / 欧州戦略)

>> to be updated in 2026

2020 Update of the European Strategy for Particle Physics

The 2020 update of the **European Strategy for Particle Physics (ESPP)** has defined the major priorities

(i) Full exploitation of the LHC and the High-Luminosity LHC

HL-LHC

できるだけ物理を引き出す (廣瀬)

(ii) An **electron-positron Higgs factory** is the highest-priority next collider

FCC-ee

(iii) Longer term: the European particle physics community has the ambition to operate a **proton-proton collider at the highest achievable energy**

FCC-hh

(Frank Z.)

高磁場 R&D / Detector R&D を進める

ILC in Japan : 早期に実現するならば、"compatible"。if so, "wish to collaborate"

- 2023.11.23 マクロン大統領の宣言

- 私のこの訪問は、CERNの職員に対する私の信頼と、この分野でのフランスのリーダーシップを維持するフランスの意志と野心を示すものである (どこにも FCC というワードはない...)

- 2024.04.26 US - CERN Joint Statement

- 広い科学分野を含む、**包括的**な内容
- FCC-FSへのUSの参加継続 (新しくない)
- FCCの諸問題が解決されて Green lightとなれば、USは委員会を立てて議論する (P5の通り)
- **法的拘束力を持たない** statement

- 2024.05.09 US HEPAP meeting

- ITNへObserverとして参加する (DOE has decided ...)
- FCC-ee : **FS継続** / 拡張 800MHz sRF (新しくない)
- Consortium (HFCC) for developing physics, experiment, and detector program

- 2024.05.23 BMBF (ドイツコミュニティのWorkshop: Future Collider @ CERN)

- p.3: **Strong Commitment of BMBF to CERN**, CERNの将来計画はBMBFにとっても重要事項
- p.4: Cost評価/Financial Plan のuncertaintyが大きく、vague (曖昧)
 - CERNの外からの大きな寄与が必要に見えるが、現時点で確実なあてはない
 - これらの問題を解決しないと、**FCC has to be considered as not affordable**
 - CERN has to diversify its efforts and **prepare for different scenarios including one without the FCC-ee.**

- $\sqrt{s} = 100 \text{ TeV}$ (以上) の hadron collider @ CERNの建設 (FCC-hh)
- その前段階としての **e+e- Higgs Factory**の建設 (FCC-ee)
技術・財政に関する Feasibilityを検討し、答申を出す

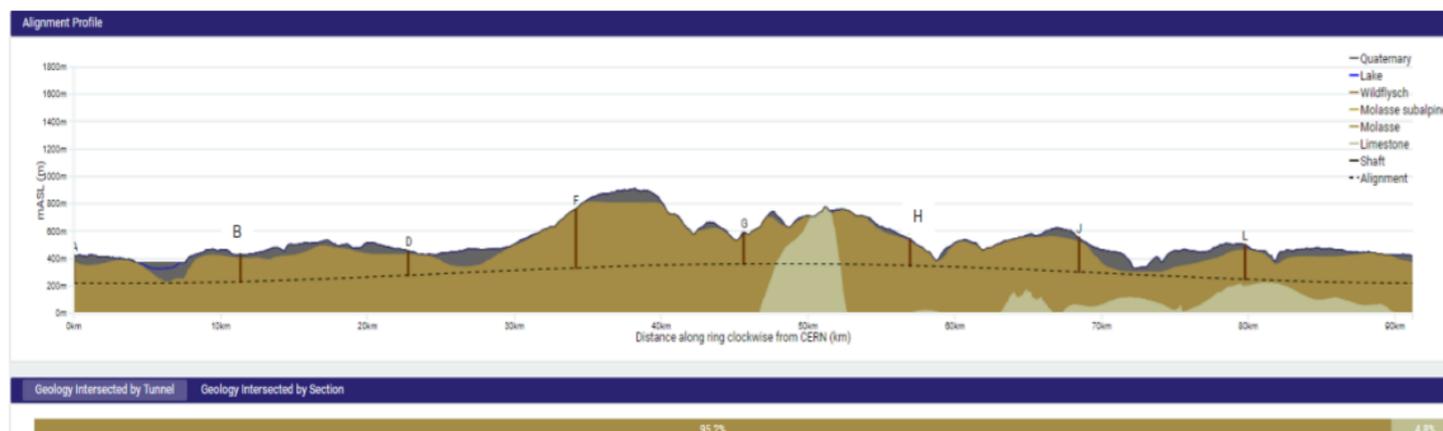
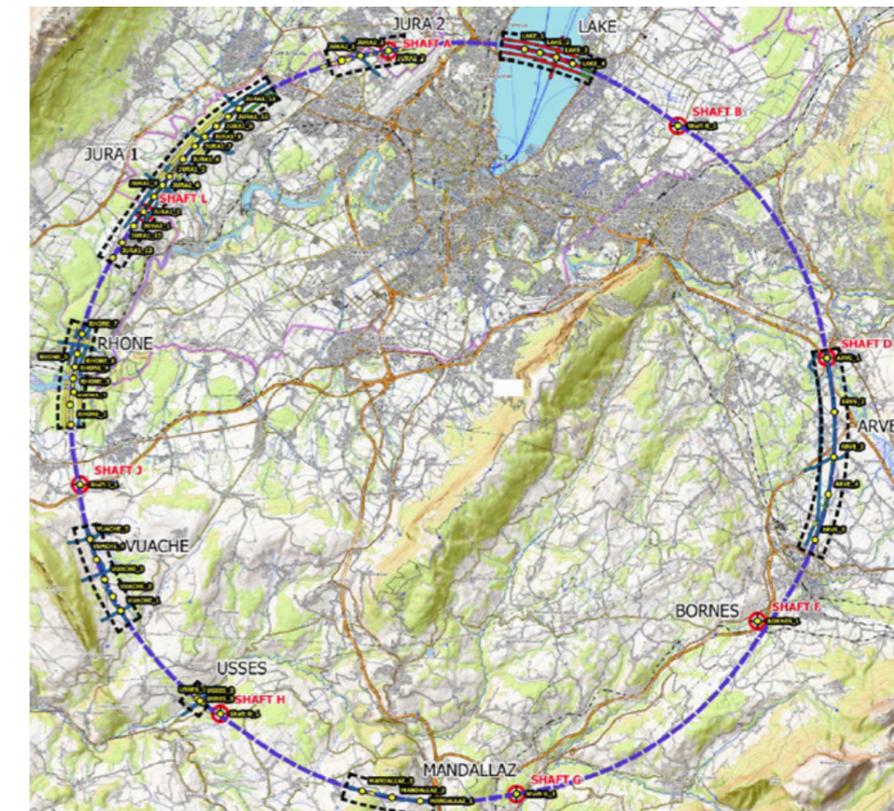
Deliverables:

- D1: Definition of the baseline scenario
- D2: civil engineering
- D3: Processes and implementation with the Host States
- D4: Technical infrastructure
- D5: FCC-ee accelerator
- D6: FCC-hh accelerator
- D7: Project cost and financial feasibility**
- D8: Physics, experiments and detectors

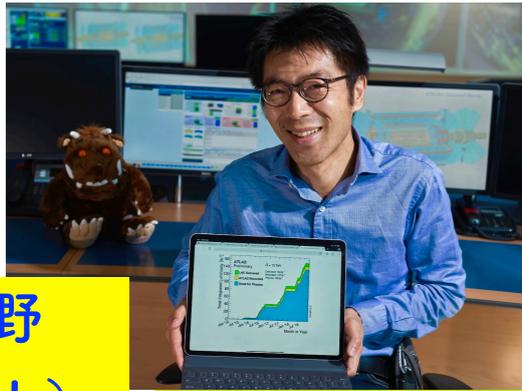


Drilling works on the Lake Geneva

- 地質調査・自治体との話し合いなど 並行に進めている
- 中間報告 (2023) 技術的観点でのShowstopperはない



95% in molasse geology → minimising tunnel construction risk



石野
(東大)



道園
(KEK)



陣内
(東工大)



大谷
(東大)



末原
(東大)

WG/TF: 従来からILCの方、 普段はATLAS or Belle II or 他の実験を主にやっているが、
将来 HFがスコープに入る世代の方々の参加を得て、研究活動/プロジェクト推進活動をしています

加速器R&D WG（道園： 山本・照沼・栗木・佐貫・阪井）

- **ILC-Technology Network** (ITN) の研究フレームワークの成果をコミュニティと共有
- この共同研究 (ITN) に参加する **国内研究者の増加** を促進する

物理WG（末原 / Junping T.： 津村・北原・中村 克・増淵・Daniel J.・Chen S.・堀井）

- Linear Colliderのアドバンテージ (**Energy/Luminosity拡張**) を活かした物理研究シナリオの構築
- 解析技術/共通の物理Topicを通じた、他プロジェクトとの連携強化
⇒ 結果として、(国内) **協力研究者の増加**

測定器WG（大谷： 居波・生出・末原・外川・中村 克・成田・前田）

- 次世代コライダーで活用される測定器技術の研究フレームワークの構築 > **協力研究者の増加**
- 新型（高性能）測定器を導入した際、物理成果がどれだけ改善されるか？ これをよく理解しながら、研究を進めていく（物理グループとのインタラクションも重要）

広報TF（陣内： 岩崎・堀井・松岡・高橋・岡田）

- 「素粒子物理学」というサイエンスの面白さについて、研究者として啓蒙する活動
- 日々のWG/TFの活動や、関連するイベントを、ILC-Japan WEBページに残し、見える形にする
▶ **軌道に乗った**

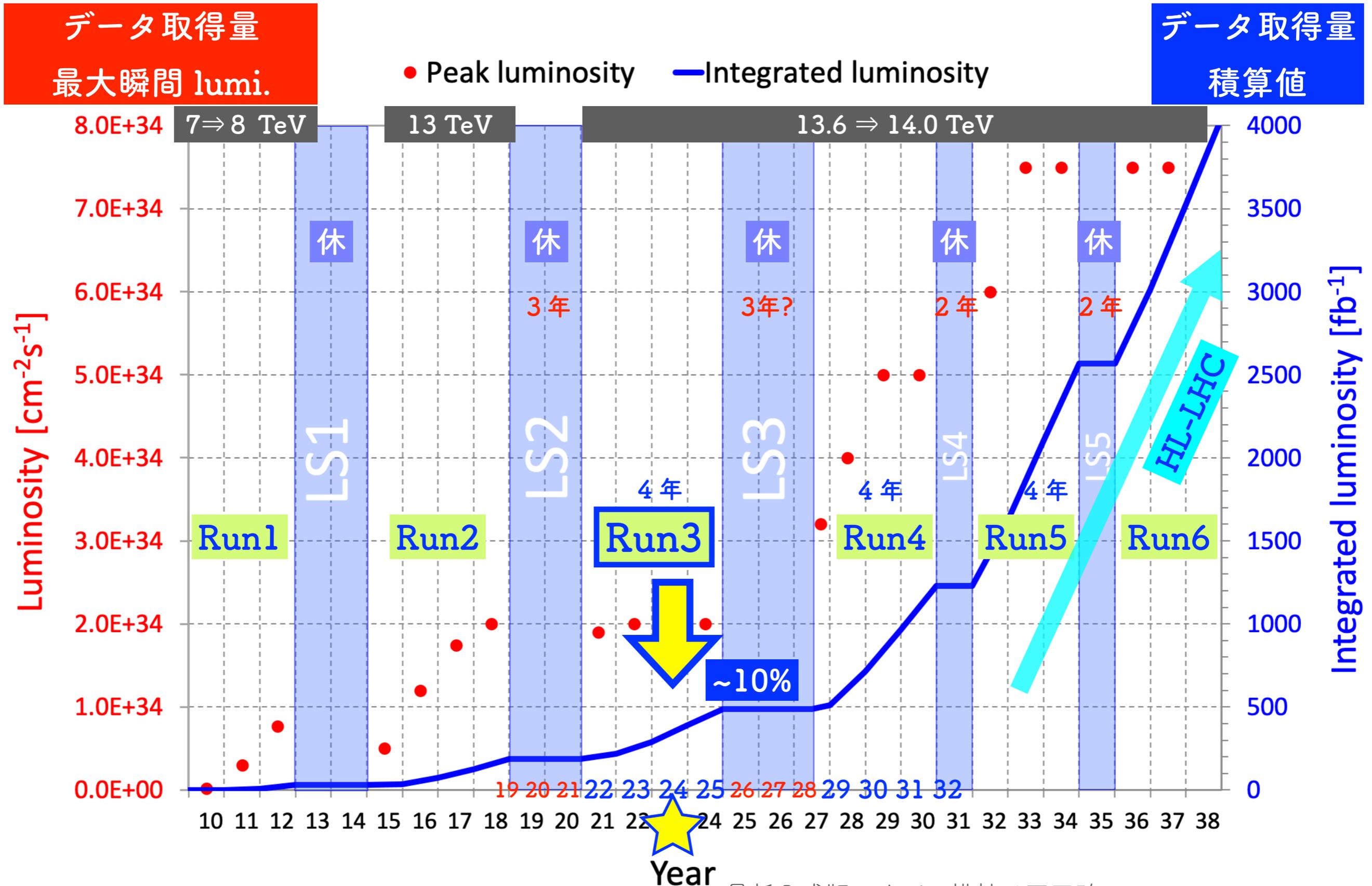
ATLAS, Belle, ... 他、現行→次世代 projectがスコープに入りそうな方々が参加

国際会議LCWS(2024年7月開催)における 日本の高エネルギー物理学研究戦略のまとめ

中家 剛【京大・教授、高エネルギー委員会委員長】

- ① **ヒッグス・ファクトリー**が高エネルギー物理学の次期プロジェクトである
(国際的な合意も取れている)
 - 世界では、CEPC、FCCee、ILCの3つが提案されている。
 - ヒッグス・ファクトリーの実現には時間がかかるため、現行プロジェクトで大きな科学的成果を創出し続け、将来技術の着実な研究開発を行うことが肝要である。
- ② 日本では、**ILC-Japan**がILC活動の中核を担っている。日本の研究者コミュニティは、ILCを実現するために主導的な役割を果たす。
 - 国際組織であるIDTやICFA、および海外の研究者コミュニティと連携し、ILCをグローバルプロジェクトとして推進する。
 - 日本の研究者コミュニティは、政府がILCの実現と誘致に対して興味を表明するよう、努力を続けている。
- ③ 国際的な枠組みとして、**ILC-Technology Network (ITN)**が設立された。ILCの建設開始に必要な主要技術要素は確立されており、ITNでは、ILCの建設設計に向けた加速器研究開発における国際協力を強化して、多くの海外研究所とネットワークを構築する。
- ④ 日本の高エネルギー物理学研究者コミュニティは**将来計画委員会**を設置して議論を始めており、日本における将来プロジェクトの戦略を国内外に向けて提案する。日本におけるプロジェクトの立案には、世界のコミュニティとの緊密な連携とそのインプットが必要不可欠である。

現行コライダー i.e. LHC から HL-LHCへ

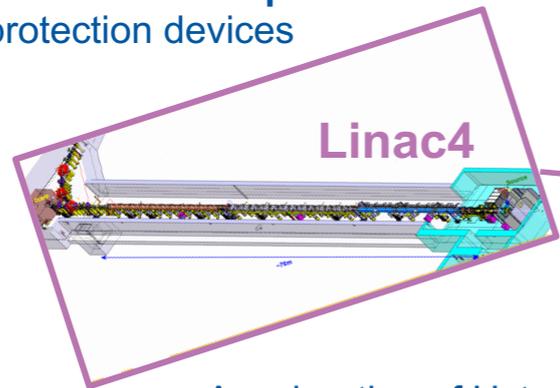


<https://lhc-commissioning.web.cern.ch/schedule/images/LHC-ultimate-lumi-projection.png> 最新公式版ですが、横軸は不正確

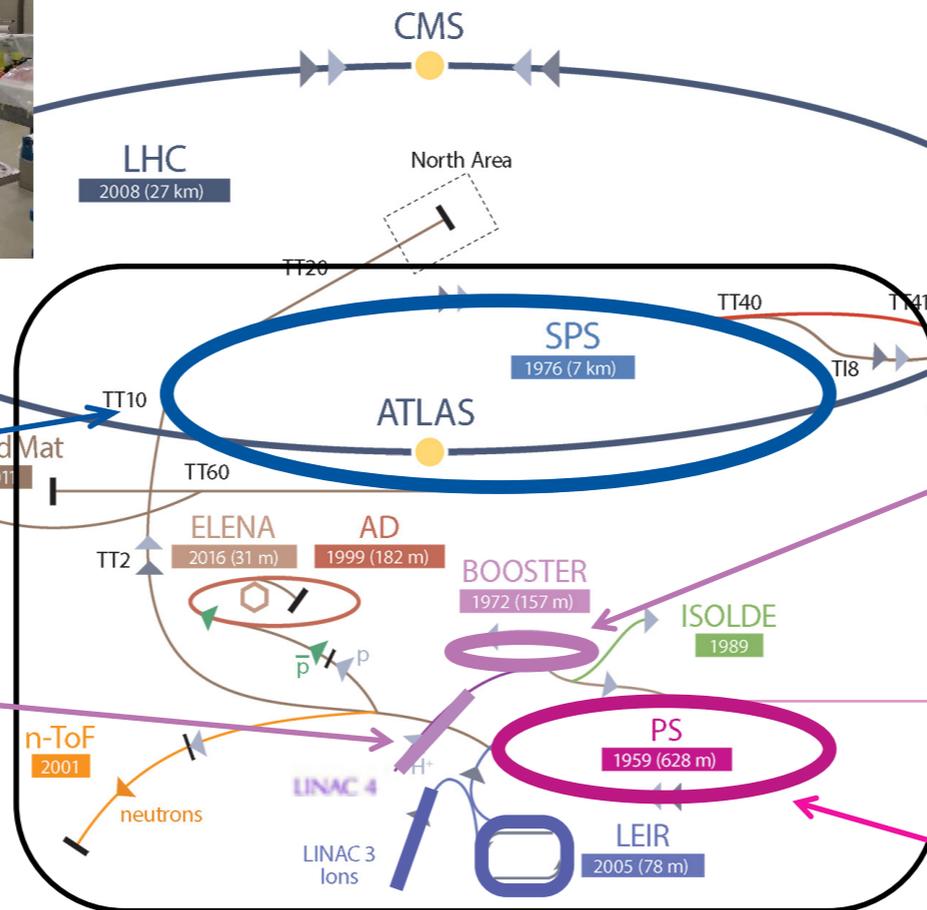
ファインメット空洞 for J-Parc
⇒ PS Booster で活用 (KEK)



- Main RF system (200 MHz) upgrade
- Longitudinal impedance reduction & partial a-C coating
- New beam dump and protection devices



- Acceleration of H⁻ to 160 MeV
- Nominal 40 mA within 0.4 μm, Run 3 target 25 mA within 0.3 μm



- 160 MeV H⁻ charge exchange injection
- Acceleration to 2 GeV with new main power

- 2 GeV injection
- New RF equipment including broadband feedback



Rumolo et al

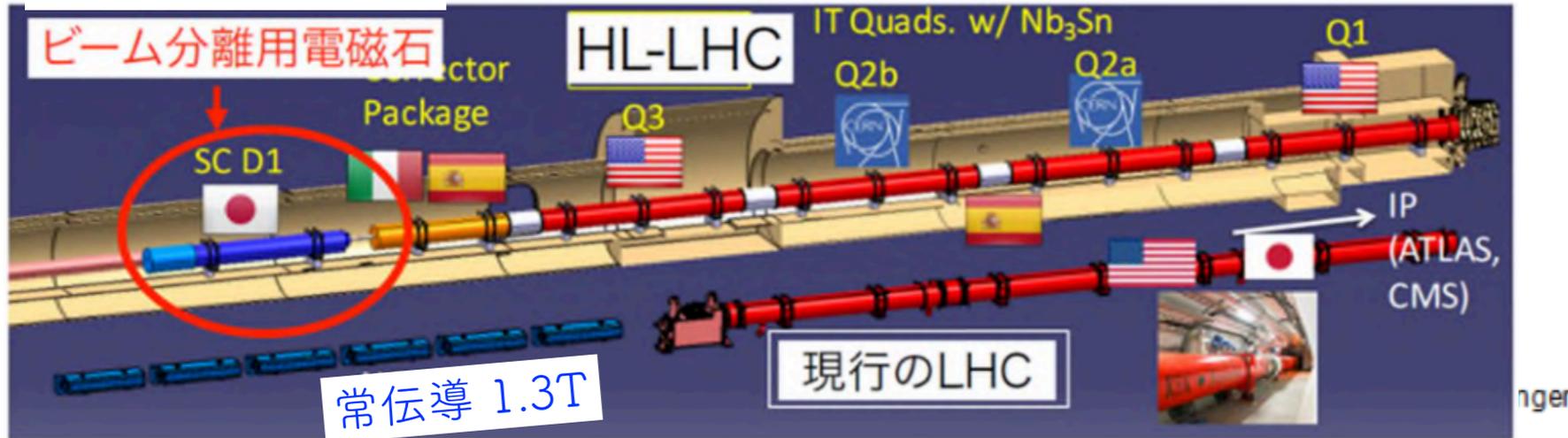
	N_b ($\times 10^{11}$ p/b)	$\epsilon_{x,y}$ (μm)	Brightness = I/ϵ
HL-LHC target	2.3	2.1	$\times 2.3$
Run-2 (2018)	1.3	2.7	

HL-LHCに必要な性能 (以上)
を満たすビームの供給可能
[準備完了]

LHC本体のアップグレード～D1磁石

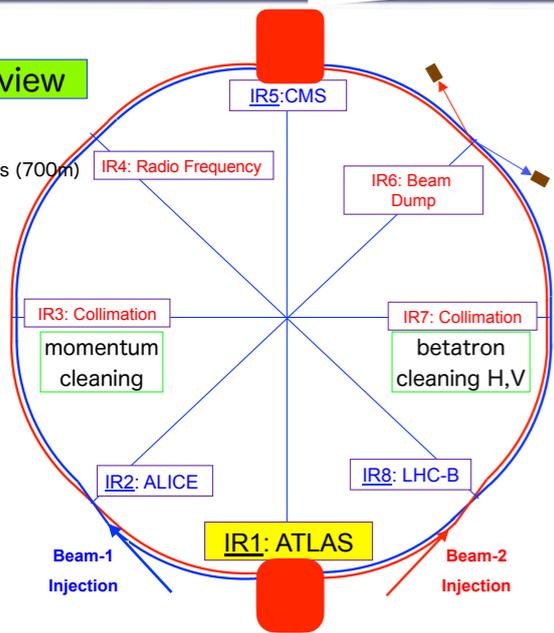
超伝導 5.6T・7m

ビーム分離用電磁石

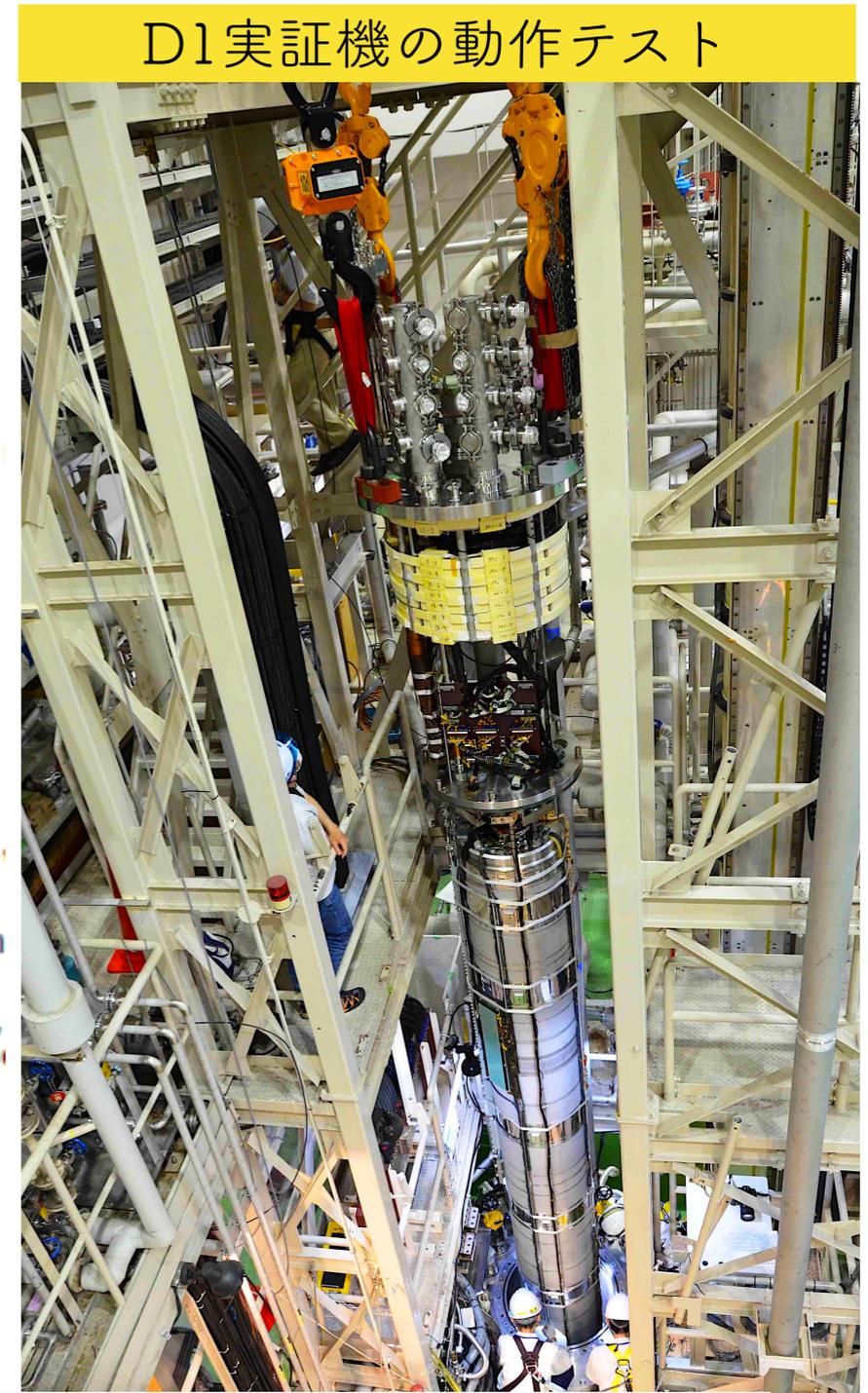
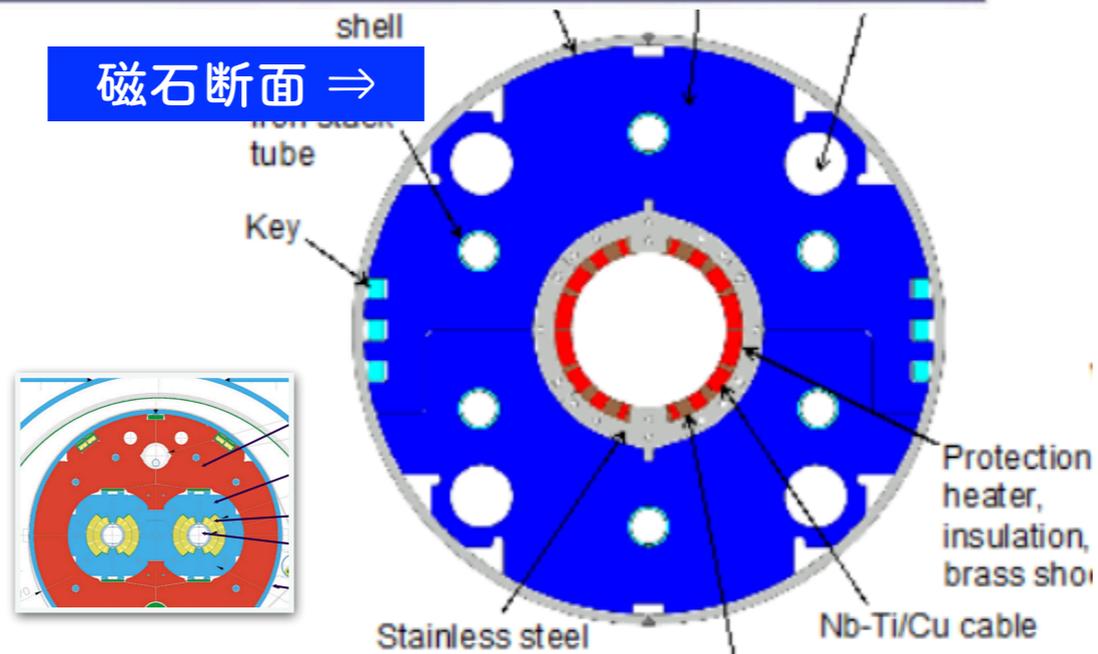


overview

sections (700m)



磁石断面 ⇒



より強くビームを収束する ⇒ 従来より短い距離でビーム分離が必要
⇒ $B=5.6T$ 、長さ = 7 m (超伝導磁石)

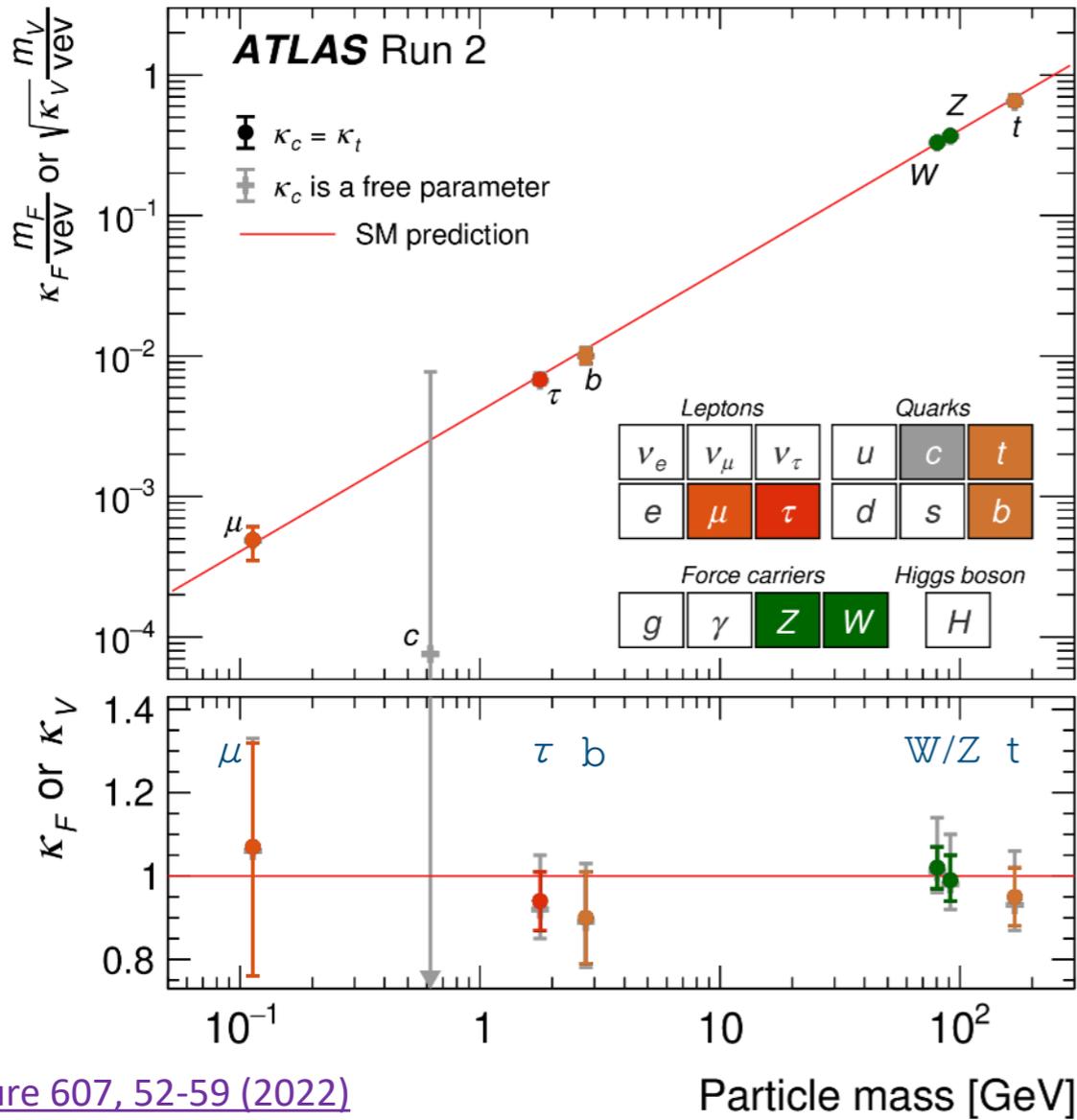
3台のショート・モデルの試作 ⇒ 「実証機」の製造と試験

KEK Cold Vertical試験：励磁に成功 (2021 Q4: KEK) → 写真

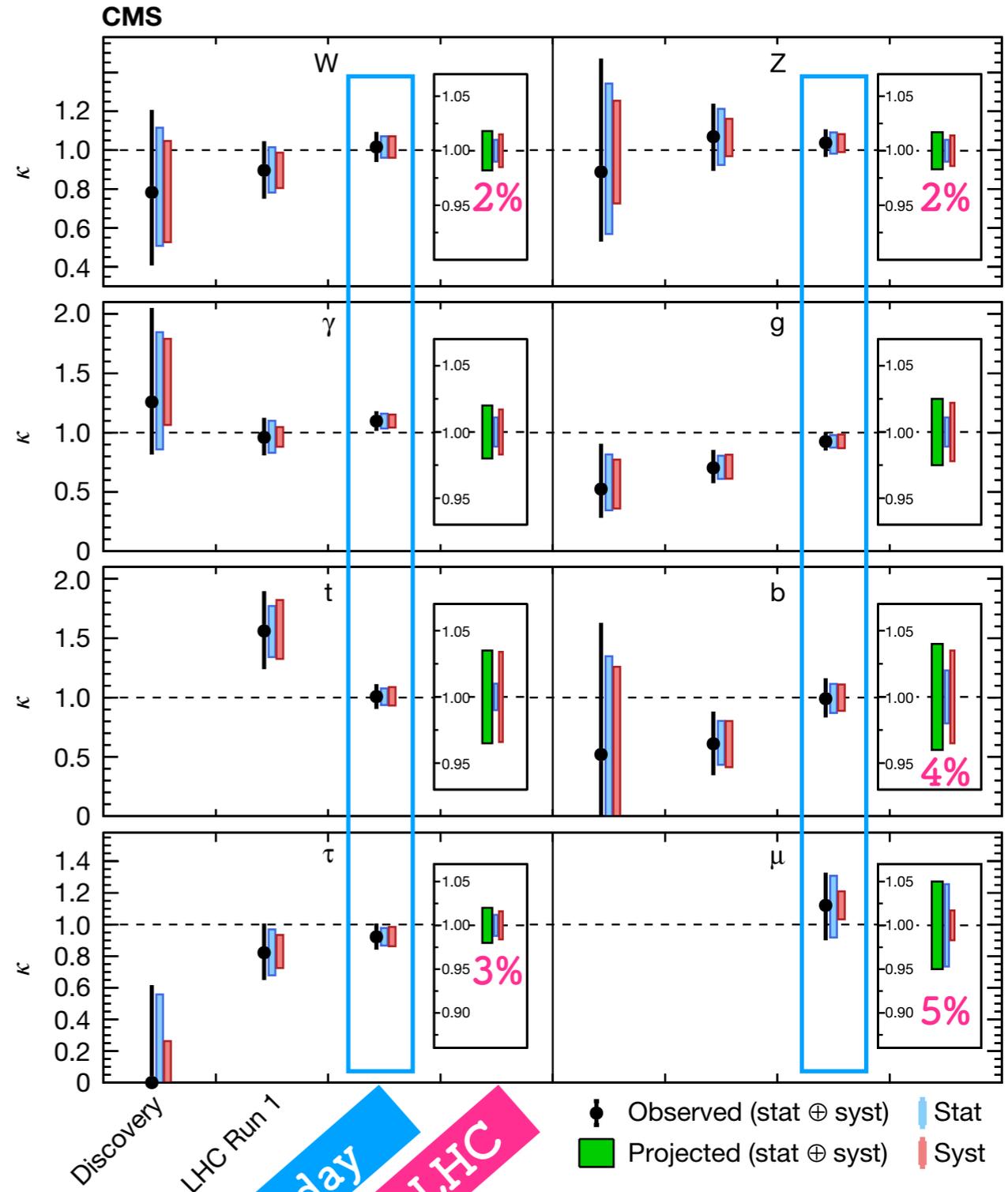
完成機の製造が進行中。 CERNに運ばれつつある。



Today : Run2 (all)



- Higgs: Origin of Fermion Mass
- error: ○ (~10% or slightly better)
- エラーの範囲で SM とコンシステント



Nature 607, 60-68 (2022)

○(10% or better) → **HL-LHC**
2-5%