

# ILCの過去と未来 (大型計画の生みの苦しみ)

末原 大幹 (東大ICEPP)

Disclaimers:

すべて個人の考えで、ILCの何も代表していません

字が多くて図が少なくてすみません

1枚だけ微妙なスライドをアップロードしません

# 何を話すか

- ILCのこれまでの歩みについて、個人の印象と感想
  - 私は、実は誘致の政治的なことにはあまりかかわっていませんので誘致活動に関しては「外から見た印象」に近いです
  - 一方、ILCグループの研究については(自分の仕事も含めて)それなりにwatchしてきたと思います
- 過去と現在の誘致戦略 (の個人的guess) とコミュニティの関係
- 今後のこと
  - 他のHiggs factoryがgoになる前にILCはgoになるの?
  - 他のHiggs factoryがgoになったらどうするの?
  - 他のHiggs factoryができなかったらILCはできるの?
- 物理は、途中で3枚だけ話します
  - 物理の面白い話は、JPSでMichael Peskinの話を聞いてください。(宣伝)

# ILC略史 (1) -2009 (湯河原合宿で見せた)

- 1980年代～ 3極でLC計画 (JLC, NLC, Tesla)
  - JLC(→GLC), NLCは常伝導、Teslaは超伝導
  - 1986将来計画答申 (R&D), 1997答申 (2000年代初頭の建設開始)
- 2001: Tesla TDR (DESY) → 採択されずXFELのみになる
- 2004: ITRPが超伝導加速空洞をendorse, ILCの発足
  - Tesla TDRにより超伝導が実現に近いと考えられた
- 2005: ILC Reference Design Report
- 2007: GLDとLDCが合体、ILDとなる
- 2009: Detector Letter of Intent (3つ) → ILD, SiDが残る

# ILC略史 (1) (私とILCの関わり原合宿で見せた)

- 1980年代～ 3極でLC計画 (JLC, NLC, Tesla)
  - JLC(→GLC), NLCは常伝導、Teslaは超伝導
  - 1986将来計画答申 (R&D), 1997答申 (2000年代初頭の建設開始)
- 2001: Tesla TDR (DESY) → 採択されずXFELのみになる
- 2004: ITRPが超伝導加速空洞をendor
  - Tesla TDRにより超伝導が実現に近いと考えられた
- 2005: ILC Reference Design Report
- 2007: GLDとLDCが合体、ILDとなる
- 2009: Detector Letter of Intent (

199x: 新書か何かで  
JLCのことを知る

2003- 常伝導加速管のstudy  
ITRP視察の準備とかにも関わる

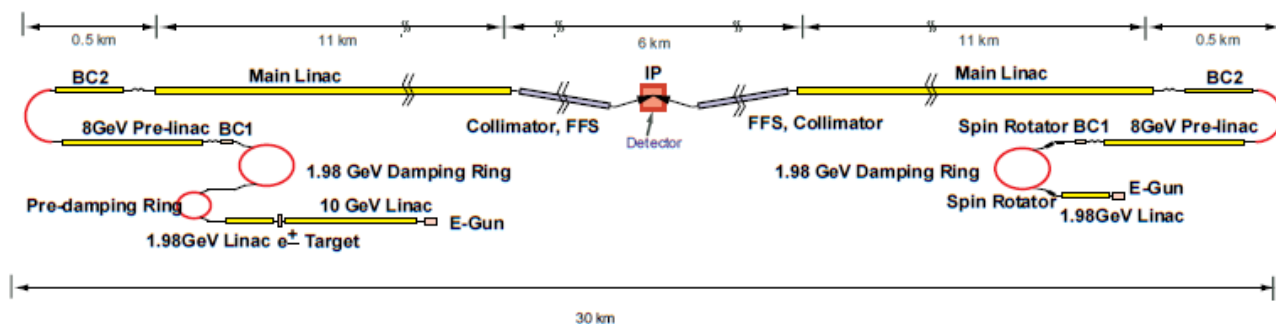
2008: 新竹モニタ (レーザ  
干渉ビームサイズモニタ)でD論

物理に移って、Lolのための  
物理解析(SUSY, tau)をしゃかりきにやる

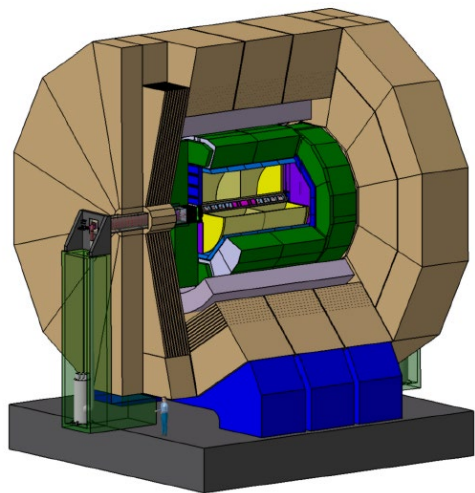


# ILC略史(1) -2009: 計画の統合とILCの成立

Electron-Positron Linear Collider JLC  
500 GeV JLC-I → 1.5 TeV JLC



1997 (駒宮委員会) 答申に乗っていたJLCの図  
常伝導だが今の設計と本質的にはあまりかわらない



ILD (2009)  
日本中心のGLDと欧州中心のLDC  
が合体して形成された

他に米国中心のSiDがある。

Particle flow conceptを具現化した  
最初の測定器コンセプト



ITRP (2004)  
超電導と常伝導を比較して、今の段階では  
超電導が実現性が高いと結論した

加速器・測定器コンセプトの統合  
→ Global projectとしてのILCのはじまり

# ILC略史(2) -2017: TDR(2013)と250 GeV ILC

- 2008: ILC議連/AAAの設立 (国内建設に向けた活動スタート)
  - (2009-12: 民主党政権, 2011: 東日本大震災)
- 2012: Higgs発見
- 2013: 国内立地を2箇所に絞り、立地評価 → 東北をendorse
- 2013: ILC TDR (500 GeV) / detector DBD
  - 加速器デザインが基本的に固まる
- 2017: 250 GeV re-baseline (Higgs massが軽かったため)
  - 高エネルギー委員会の報告書(ILC250を検証する浅井委員会)

# ILC略史(2) -2017: TDR(2013)と250 GeV ILC

- 2008: ILC議連/AAAの設立 (国内建設に向けた活動スタート)
  - (2009-12: 民主党政権, 2011: 東日本大震災)
- 2012: Higgs発見
- 2013: 国内立地を2箇所に絞り、立地評価 → 東北をendorse
- 2013: ILC TDR (500 GeV) / detector DBD
  - 加速器デザインが基本的に固まる
- (この間LHC 13 TeVの結果待ちの様相になって、誘致進展遅い)
- 2017: 250 GeV re-baseline (Higgs massが軽かったため)
  - 高エネルギー委員会の報告書(ILC250を検証する浅井委員会)

# ILC略史(2) -2017 TDR (2013)と250 GeV ILC

私とILCの関わり

- 2008: ILC議連/AAAの設立 (国内建設に理論家との物理解析と並行して  
– (2009-12: 民主党政権, 2011: 東日本大震災) Jet clustering, flavor tagging  
ツールを書く → 広く使われる
- 2012: Higgs発見
- 2013: 国内立地を2箇所に絞り、立地評2013- 九大でシリコンカロリメータ  
開発。フランスのengineerとの  
関係に苦勞する  
(あとあまりお金がない)
- 2013: ILC TDR (500 GeV) / detector  
– 加速器デザインが基本的に固まる
- (この間LHC 13 TeVの結果待ちの様相になって、誘致進展遅い)
- 2017: 250 GeV re-baseline (Higgs mass 2017頃 カロリメータを  
日本で組み立てられるようにする  
– 高エネルギー委員会の報告書(ILC250を核) 並行してLGADの研究も



# 2004-TDRまでになにができたか

## • 加速器

- 国内で超電導空洞の開発・製造体制ができた
- ATFで~37nmのビームサイズ達成
  - 1.3 GeVとしてILCに近い収束性能 (ILCは5.7 nm)
- 詳細設計 (opticsとか、トンネル設計とか)

## • 物理・測定器

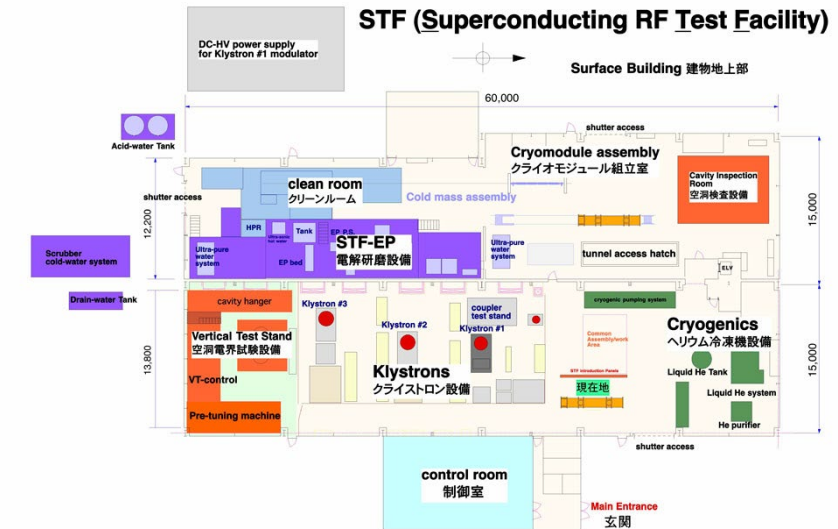
- ILC仕様の基本設計 (原理実証 → 実機仕様へ)
  - 日本のactivityは全体の2-3割くらい
- 主要な物理モードの解析結果
  - Higgs coupling, self couplingなど
  - 再構成の開発も (flavor tagging, lepton/tau tagging, その他)

### 超伝導リニアック試験施設 (STF)

#### STFの目的、概要



STF(Superconducting RF Test Facility)は、国際リニアコライダー(ILC)のための超伝導加速空洞や加速モジュール、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ながらも、その他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し、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。



# ILCの開発予算

- 加速器
  - 常伝導から超電導に切り替えするのにかなりお金がかかった
  - KEKの予算 + 文科省の予算 (量子ビーム)
  - かなりの人員規模と施設を備えた活動になっている (iCASA)
  - ATF/2 (damping ring・final focus)も継続
- 物理・測定器
  - 2006-10 (学術創成), 2011-15 (特別推進)でだいぶ進んだ (欧州も同等以上のfundingを持っていた)
    - ただしポスドクを雇うのに失敗 (2011)
  - 2016- お金がなくて最低活動維持モード (ポスドクを雇えない)
    - 本質的には、もう破綻している

# 将来計画の予算

- 予算化されていないのでプロジェクト経費がない
- 若手が手を動かさないとstudyは進まない
  - 若手を雇う予算が必要 (ポスドクも、そのあとも)
    - 測定器開発には物件費も必要なことは間違いないですが。
  - 競争的資金に頼れる期間は限られている (そして、破綻した)
    - 競争的資金がなければもっと早く問題が表面化していたかもしれない
- 「コミュニティの」将来計画であるならば、手を打つ必要があった
  - ILCの人だけに頼るのであれば、コミュニティの将来計画とはいえない
    - 実際、この20年間、実質的にはコミュニティは本気でなかった。
  - どうするのか？

# 「古い人ばかり」という印象について

- ある意味では事実
  - KEKではtristanの後に加入した人が多くて固定化した
    - 新しい人をほとんど入れなかったのは?誰の判断?
    - グループ間の交流の問題も
  - 大学には個別の問題がいろいろ
    - 将来計画だけをやるのはやはり無理がある。兼任が妥当
    - 若い人が兼任しにくい状況がある? (人間関係?)
- キャリアパスにならないから若い人を雇えないという声をよく聞く
  - 将来計画にとってはkilling discussionである
  - 短期に100%やる人、長期にある程度のfractionでやる人のバランス
  - cf. FCCee now



# 250 GeV ILC: 情報開示の問題

- 250 GeV ILCが前面に出された2017年ごろ、energy upgradeをあまり外向けに話さないようにするという空気があった
  - Upgradeをいうと、total costを聞かれてそれを必要予算とされてしまうことを恐れた
    - 基本的に、予算は一人歩きする。(一度出るとほとんどcontrol不可能)  
ILCは5800億と言っているのに、文科省では8000億になって、新聞もそうなった
  - 250 GeVにしたのは125 GeV Higgsとcoupleしていて、非常に妥当な決断である。(もちろんupgrade pathを前提として)
  - しかし、外向けの議論が主に内向きに働いた
    - high energyは無条件にattractiveなので魅力を下げること
    - 特に理論の人たち

# 電子・陽電子 Target Energies

91~250 GeV

Oblique parameter決定, W/Z mass,  $b/\tau$ の精密測定

250 GeV

Higgs 結合定数測定 ( $\sim 1\%$ ), Higgs稀崩壊 (軽い新物理)  
(TeV新物理間接探索)

350 GeV

Top質量の精密測定 → 真空の安定性

500–550 GeV

Higgs自己結合 (20–30%),  $ttH$ 結合

1 TeV

Higgs自己結合 (10%) → 物質生成

250 GeV – a few TeV

TeV新物理直接探索

Natural SUSY (250 GeV – 1 TeV)

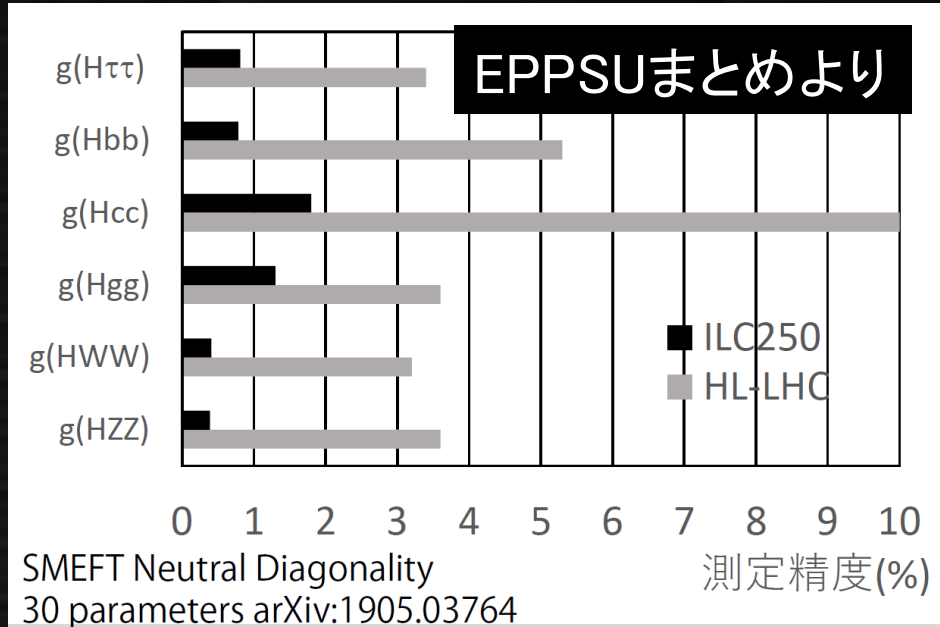
1 TeV Higgsino

3 TeV Wino

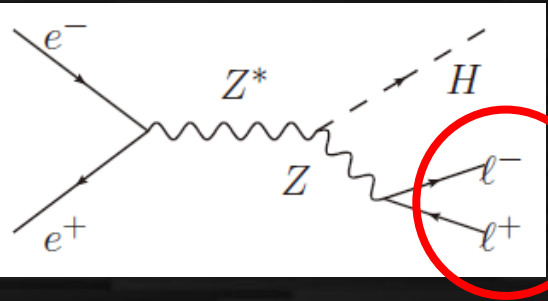
# Higgs physics at ILC

## Higgs稀崩壊探索

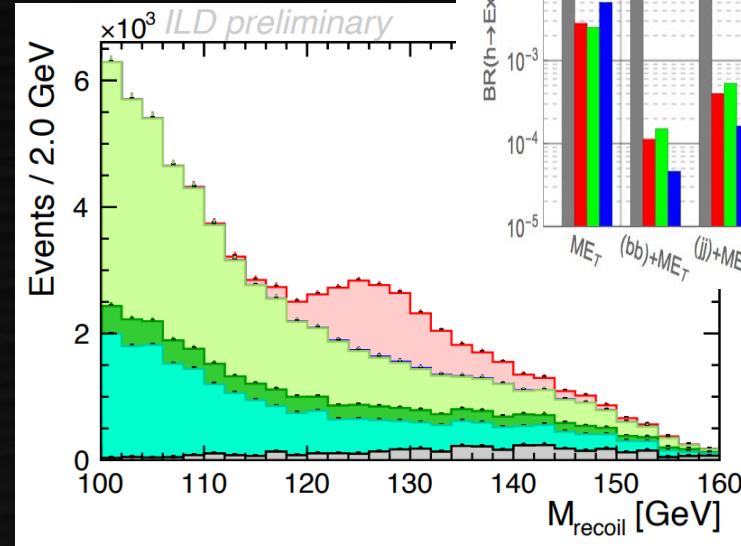
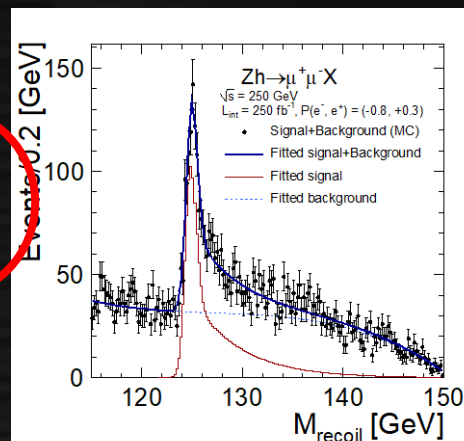
### Higgs崩壊モードの分類



SMEFTで約一桁の精度向上



$$m_h = \sqrt{E_h^2 - p_h^2}$$



### Higgs invisible崩壊

モデル非依存な Higgs 稀崩壊の探索 (0.01–0.1% BR)  
 全断面積測定  
 全崩壊幅の測定も  
 軽い新物理に感度あり  
 Higgs portal等

# (Linear) Higgs factoryの意義

- TeV BSMの強力なプローブ

- Higgsはfundamental question(→BSM)に直結
  - Naturalness, クォーク質量階層性
- 2HDM (incl. SUSY), Composite HiggsはBSMの代表選手, Higgsと深く関連

- Higgs portalはGeV BSMの重要要素

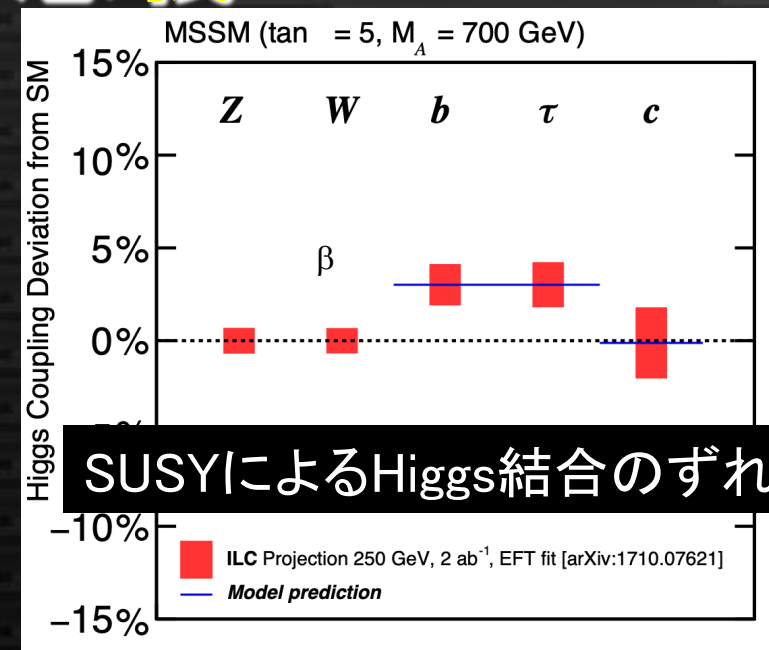
- Higgsはほぼ唯一のプローブ (e.g. 稀崩壊)

- 自己結合をどうしても測りたい

- 500 GeV (正の干渉)は特異的
  - $\lambda > 1$ で感度上昇
- EW baryogenesisには必須

- ヒッグストップ質量と真空安定性

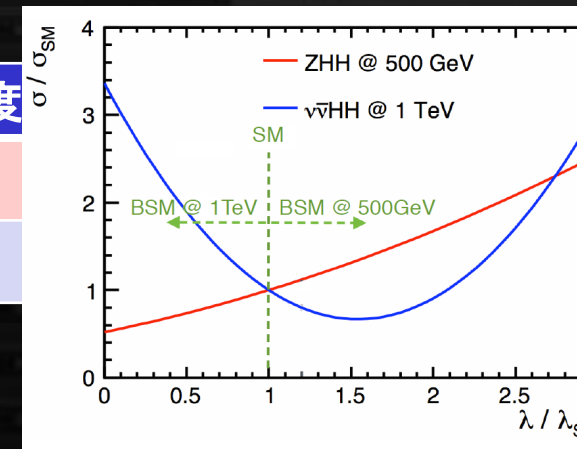
- (Higgsではないが) 最終的に1 TeV Higgsinoの直接探索へ



Higgs自己結合測定精度 @ ILC

channel	$\sqrt{s}[\text{GeV}]$	$L [\text{ab}^{-1}]$	$\lambda$ 精度
s (正の干渉)	500	4	27%
t (負の干渉)	1000	4	10%

深層学習で精度向上を期待  
3 TeV ILCで~5%へ





# Global or international project?

- 250 GeVによってILCはglobalからinternational projectになった
- 意図的でもあった?  
(誤解だとも言われるが)
- Global projectだと問題があったから?

## ICFA Statement on the ILC Operating at 250 GeV as a Higgs Boson Factory

The discovery of a Higgs boson in 2012 at the Large Hadron Collider (LHC) at CERN is one of the most significant recent breakthroughs in science and marks a major step forward in fundamental physics. Precision studies of the Higgs boson will further deepen our understanding of the most fundamental laws of matter and its interactions.

The International Linear Collider (ILC) operating at 250 GeV center-of-mass energy will provide excellent science from precision studies of the Higgs boson. Therefore, ICFA considers the ILC a key science project complementary to the LHC and its upgrade.

ICFA welcomes the efforts by the Linear Collider Collaboration on cost reductions for the ILC, which indicate that up to 40% cost reduction relative to the 2013 Technical Design Report (500 GeV ILC) is possible for a 250 GeV collider.

ICFA emphasizes the extendibility of the ILC to higher energies and notes that there is large discovery potential with important additional measurements accessible at energies beyond 250 GeV.

ICFA thus supports the conclusions of the Linear Collider Board (LCB) in their report presented at this meeting and very strongly encourages Japan to realize the ILC in a timely fashion as a Higgs boson factory with a center-of-mass energy of 250 GeV as an international project<sup>1</sup>, led by Japanese initiative.

<sup>1</sup>In the LCB report the European XFEL and FAIR are mentioned as recent examples for international projects.

# 情勢の変化: 海外

## EPPSU 2013:

US (P5 2023)

FCCee or ILCをequal-footing  
でfavor, 先にできたほうに乗る

LHCと同程度のcontribution

e) There is a strong scientific case for an electron-positron collider, complementary to the LHC, that can study the properties of the Higgs boson and other particles with unprecedented precision and whose energy can be upgraded. The Technical Design Report of the International Linear Collider (ILC) has been completed, with large European participation. The initiative from the Japanese particle physics community to host the ILC in Japan is most welcome, and European groups are eager to participate. *Europe looks forward to a proposal from Japan to discuss a possible participation.*

## EPPSU 2020:



A. An electron-positron Higgs factory is the highest-priority next collider. For the longer term, the European particle physics community has the ambition to operate a proton-proton collider at the highest achievable energy. Accomplishing these compelling goals will require innovation and cutting-edge technology:

- *the particle physics community should ramp up its R&D effort focused on advanced accelerator technologies, in particular that for high-field superconducting magnets, including high-temperature superconductors;*
- *Europe, together with its international partners, should investigate the technical and financial feasibility of a future hadron collider at CERN with a centre-of-mass energy of at least 100 TeV and with an electron-positron Higgs and electroweak factory as a possible first stage. Such a feasibility study of the colliders and related infrastructure should be established as a global endeavour and be completed on the timescale of the next Strategy update.*

*The timely realisation of the electron-positron International Linear Collider (ILC) in Japan would be compatible with this strategy and, in that case, the European particle physics community would wish to collaborate.*

## FCC feasibility study:

CERNが5年間で100MCHF (150億円)使って  
FCCができるかどうか検証する (-2025)

- 人がたくさんいる(ように見える、少なくとも)
- お金は正義

FCCeeの予算はILCの2-3倍 (FCChhは+6倍)

Funding schemeが最大の課題

FCCee go or no-go が最大の注目点に

# No to international project

## • International projectは「No」になった

2021.2.25

○萩生田国務大臣 ILC計画は、全長数十キロの直線上の加速器を造り、宇宙創成の謎の解明を目指す壮大な計画であり、素粒子物理学上の学術的意義を有するものであると認識しております。

K E Kが国に I L C 準備研究所の予算を要求する前提として、準備研究所の組織機能や研究開発計画の妥当性、準備研究所に対する海外からの資金拠出を含んだ参加の見通しを得ることを条件としていることは承知しております。

一方、文科省としては、 I L C 計画について検討を深めるためには、準備研究所のみならず、 I L C 計画本体について、国際分担や技術的成立性を含めた様々な課題が解決されるとともに、国内外の幅広い協力が得られるという見通しが必要であると考えております。

これはまだ曖昧な答弁で、「ILC計画について検討を深めるため」がpre-labとは明確にはわからない  
しかし、英語では

- Under the current situation that the perspective of broad **internal** and external cooperation for the ILC project itself as well as its pre-laboratory is not promised, it is difficult to obtain the people's understanding in Japan for investing the pre-laboratory. **It is necessary to obtain the clear perspectives on financial contributions to the ILC project itself from the US and European countries in prior considering the pre-laboratory.**"

と「本体の予算見通し」がpre-labの条件であることが明確になっている。→ 文科省の意志？



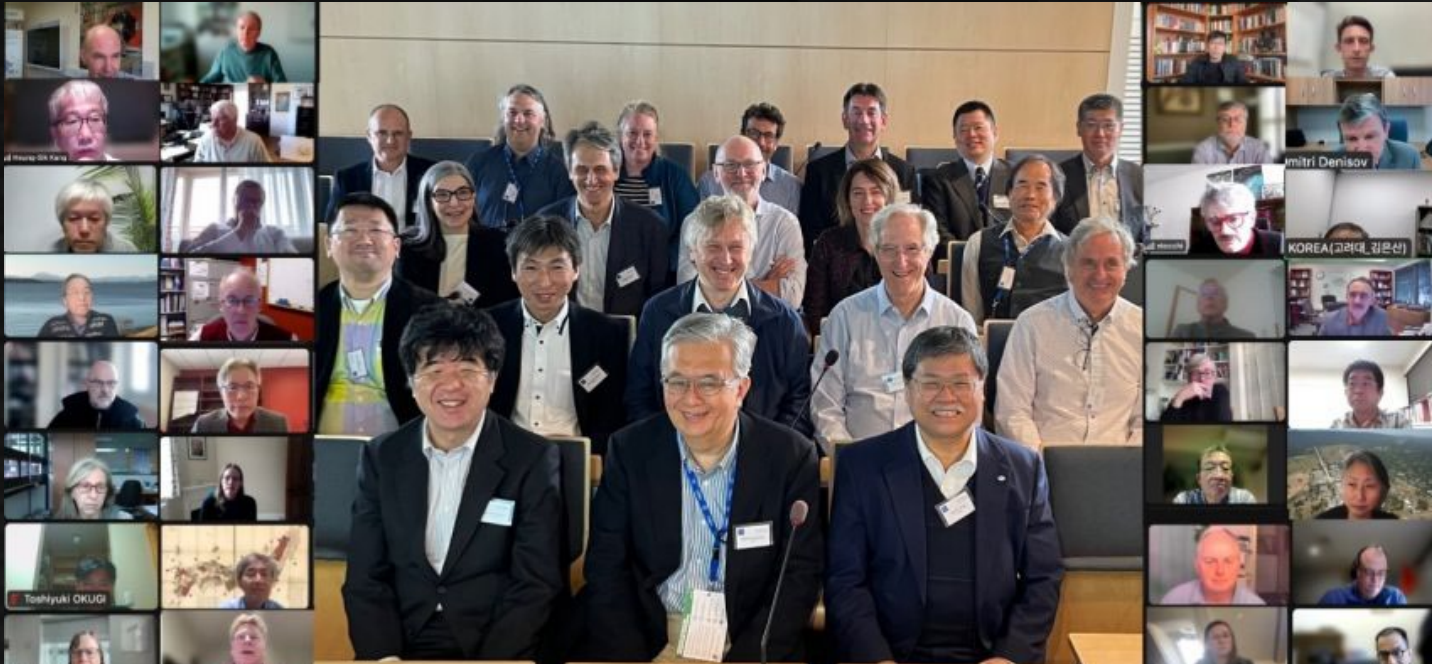
# Globalに戻る: ILCの誘致戦略 (2020-)

- 文科省に嫌われていてはどうにもならないので仕切り直しにした
  - 協調路線でITNを実現できた (国際協力をメインに据えている)
  - ITNをてこにglobal projectのための議論をしたい
    - Progress?
- 欧州(or CERN)はFCCeeに現状全振りしているのでglobal projectの議論にはたぶん真剣に乗ってこない
  - FCCee自体はCERN主導なのでglobal projectではないっぽい
  - お金がどうにもならない場合にこの文脈が注目されるかも
    - でも次の欧州戦略以降 → かなり遅い



# ITN information meeting @ CERN

2023年10月



ITN (ILC technology network)

Pre-labの推進項目のうち  
time-criticalな部分の技術開発を  
国際協力で進める組織  
日本から予算(一部?)が出る

ほぼ全てのワークパッケージにいずれかの研究所から関心が表明されました。今回の会議をKEKと共催したIDTの中田達也議長は「21もの研究機関が、具体的な技術項目を挙げてITNへの参加に興味を示してくれたことは、非常に大きな成果だと考えています」と述べ、今後の活動の進展に期待をよせています。

\*ブルックヘブン国立研究所、トーマス・ジェファソン国立加速器機関、アルゴンヌ国立研究所、コーネル大学、フェルミ国立加速器研究所、ローレンス・バークレー国立研究所、SLAC国立加速器研究所（以上米国）、加TRIUMF、CERN、イタリア国立核物理研究所（INFN）、英ジョン・アダムズ研究所、英STFC ASTec研究所、ドイツ電子シンクロトロン研究所、スペインCIEMAT研究所、スペインIFIC研究所、仏サクレ研究所（CEA）、仏IJC研究所、豪シンクロトロン、高麗大学、浦項加速器研究所、KEK

# ILC go / no goの3シナリオ

- FCCeeが次のEPPSU (~2027)でgoになった場合
  - ILC as global projectは短期的にはdeadになる
  - CEPC goの場合はless clear, 逆にUSが強力にpushしてILCを作らせるかもしれない
  - 国内コミュニティの対応を考えないといけない
- FCCeeが次のEPPSUでgoにならない場合
  - ILC (or CLIC) in Europe がgoになる (たぶんない) → 上と同じ
  - 何も決められない (e.g. global projectの文脈で再検討)
    - Global projectの文脈にILCも乗るシナリオ (遅すぎてless favored)
    - このタイミングで日米で強力に押して3極でILCを実現する
- FCCeeより前にILCをgoにする
  - Ultra Cがないとむり(?)

# コミュニティはどうするの？

- FCCeeが行く場合
  - 乗るなら今からやっておかないと日本のリソースでessential contributionをするのは無理
  - 乗らない選択肢はあるの？ たぶんない
  - お金 (~1000億)だけ吸われるのが最悪のシナリオ
- FCCeeが行かない場合
  - ILCを本当にやる気ならsignificantにactivityを上げないと無理
  - 誰がやるの？
  - FCCeeもいかない、ILCも何もいかない → 分野は致命傷かもしれない
  - 中国に頼る？ (USは現状乗らない、日本にとってシビアな判断になる)



# Personal proposal

誰にも相談していません

- 物理・測定器はFCCeeもILCもたいしてやることはかわらない
  - ECFA Higgs factory study: effort as no specific project
- Higgs factory effort (ILC/FCCee)として国内でeffortを増やす
  - 軸足はILC, ただしFCC communityにも積極的にアピールする (食い込む) FCCeeにも公式に入る
  - コミュニティの努力が必要 (みんなでお金をとるとか)
  - physics & softwareは経験的に優位がある (Higgs/BSM)
  - 検出器のkey componentも取ることが必要 (silicon, calorimeter, 他)
- 何かHiggs factoryができればactivityが生きるように戦略
  - できない場合どのみち分野がやばいので博打ではないと考える
- 加速器は当面ITNに集中してもよい(?)
- ご意見求む



# 新しい物理、測定器、加速器 (1)

- 測定器: 新たな測定器、新たな設計を提案
  - ILD/SiD: Picosec timing detectorはまだ入ってない (要素開発のみ)
    - どういう測定器をどう置くのか? 何も決まってない
    - その他Particle IDとしてRICHを入れるとか、calorimeterをMAPSにするとか
  - FCC detectors: まだ固まっていないことがたくさん
    - 今入っていけば(手持ちの技術によるが)主導権をとれるかも
  - まったく新しい設計も?
    - Trackerを<100 nm resolutionにしてultra compactな測定器とか (低温にする?)
    - もっと新しいもの? (量子センサー? 現状no ideaですが)
- アイデア募集会みたいなのをやってみると面白いかも
  - いいものができればdetector conceptへ??

# 新しい物理、測定器、加速器 (2)

- 物理/再構成技術

- 再構成ツールを深層学習で置き換えていく

- Flavor tagging: LHCでやっている方法はかなり使えることがすでに判明
      - Bottom, Charmに加えてStrange, Gluon, またjet charge IDも
    - Particle flow: より難しい (LHCとは測定器が本質的に異なる)
      - 今やっています (1年くらいでものになるようにしたい)
    - Low level dataを直接物理解析に使うことももちろんやりたい

- 特に自己結合の性能が再構成性能に直結している

- Higgs rare decay (含invisible)やSMのtriple gauge couplingなども

- やってない物理過程もまだたくさん (学生向けターゲット)

- LHCの解析と同等な手法が使えるものも? 一緒に解析できるか?

# 新しい物理、測定器、加速器 (3)

## • 加速器

### – High gradient超電導空洞

- 表面処理 (to ~45 MV/m)
- 進行波 (to ~70 MV/m)
- 積層薄膜 (to ~100 MV/m)

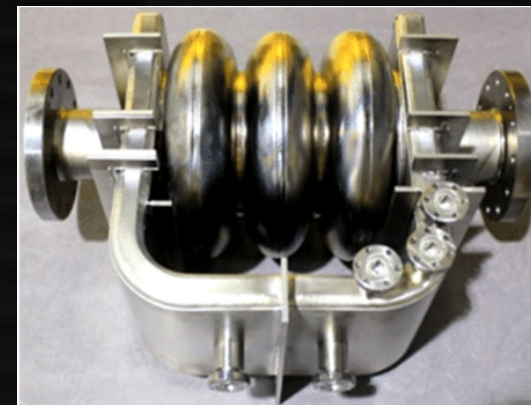
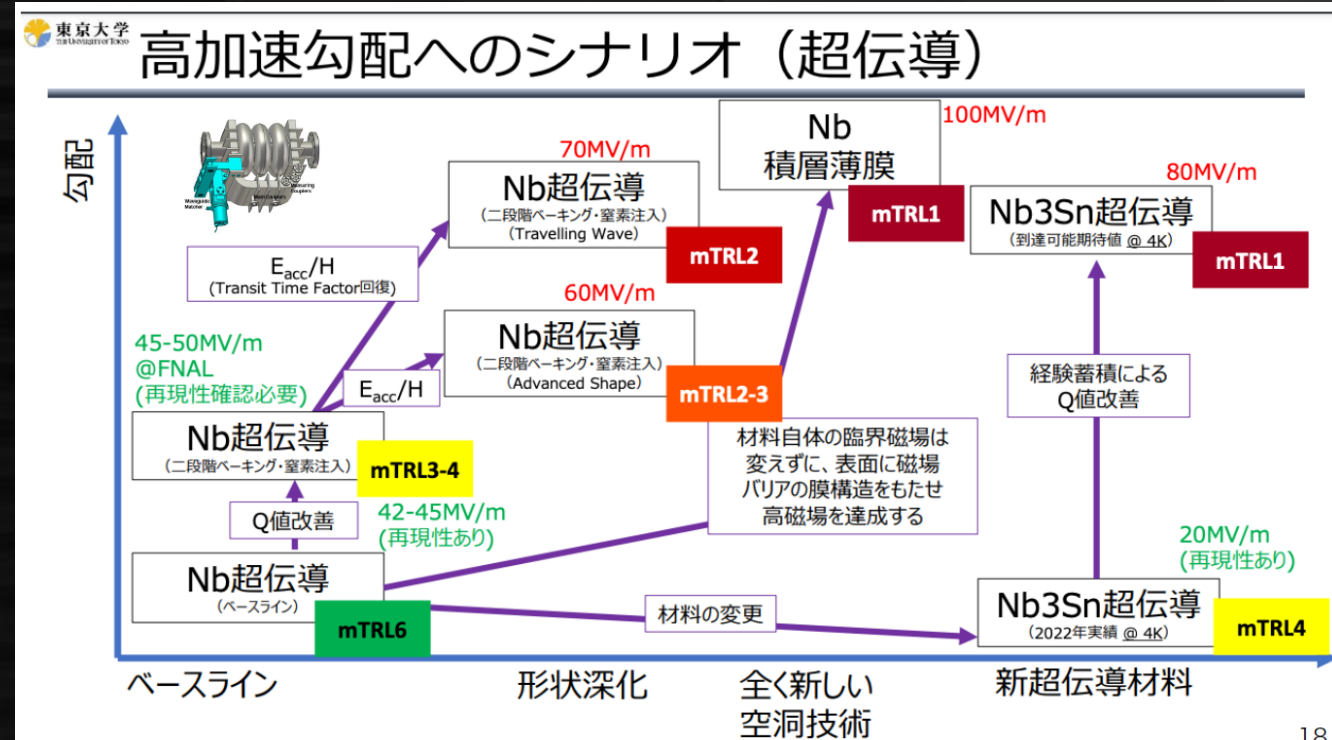
→ TeVに行くには必須技術

### – 常伝導/プラズマ

- さらに将来の技術 ( $\gg 1$  TeV)

### – 加速以外の技術もいろいろ

- 陽電子源、最終収束、ビームダンプetc.



超電導進行波管  
Qが高いので  
チューニングが大変

# おわりに

- ILC実現が近づいたことは2, 3回あったが実現しなかった
  - 重要な要素の一つは、コミュニティの熱量
- 現在、ILCが実現する確率は必ずしも高くない  
(けど極端に低くもない、と思う)
  - 現在の戦略はFCCeeの状況に左右される  
(FCCeeの実現は決して自明ではないが、可能性はある(?))
  - Higgs factory自体の実現性は高まっている
    - FCCee or みんなで作るHiggs factory
- 国内のactivityを高めていかなければ、  
日本はenergy frontierの橋頭堡を失う



