

ILC計画に関する主な 課題について

文書：

https://www2.kek.jp/ilc/wp-content/uploads/2021/07/20210602_ILC-kadai.pdf

サマリースライド：

<http://www.jahep.org/files/ILC20210719.pdf>

藤井恵介

2021/08/21

ILC 計画に関する主な課題について

著者

高エネルギー物理学研究者会議、高エネルギー加速器研究機構

2021.6.2

序文

2019 年以降、高エネルギー物理学研究者会議(JAHEP)並びに高エネルギー加速器研究機構(KEK)は、国際リニアコライダー(ILC)計画に関する残された課題の解決のための分析・対応を国内および国際協力によって行ってきた。本文書は、**ILC 計画に関する主な課題について、課題解決に向けた取り組みの現状、今後の方策と見通しを、ILC 計画提案者の立場でまとめたものである。**

… ILC 計画に関する 2019年以降の主な進展（省略） …

ILC 計画に関する**残された課題**については、その多くが解決のため相応の人的物的資源を必要とすることから、**ICFA** は、2020 年 2 月、日本をホストとし各国の参加研究機関が正式に覚書を交わした上で資源を持ち寄り **ILC 準備研究所を設置して、その枠組みの中で最終的に課題をクリアすることを推奨**した。そして 1 年半程度をかけ ILC 準備研究所設立の準備を行う国際推進チーム(IDT)を 2020 年 8 月に設置した。

以下、**文部科学省 ILC に関する有識者会議「ILC 計画見直しを受けたこれまでの議論のまとめ」** [8]、**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所見」** [9]で指摘された課題について、**囲み枠の中で、取り組みの現状、今後の方策と見通しに関する要点を ILC 提案者側の視点で回答する。**

主な課題のリスト

有：有識者会議指摘事項、学：学術会議指摘事項

文科省指摘課題					分類
1 国際的な研究協力 及び費用分担の見 通し		ア	非宿主国の十分な貢献を含む現実的かつ持続可能な国際費用分担	有	国際費用分担
		イ	諸外国のサイエンスカウンシル等におけるプロジェクトの承認と各国政府の資金確保に向けた議論の進展	有	各国のSC議論と資金確保
		ウ	国際協力を前提とした人材の育成・確保等の明確な見通し	有	人材育成／確保
2 学術的意義や国民 及び科学コミュニテ ィの理解		ア	欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC誘致の意義の整理	学	誘致の意義
		イ	素粒子物理学分野における人材配置や予算配分を含めた議論や諸学問分野の大型計画も含めたILCの位置づけに関する議論	学	コミュニティ合意
		ウ	成果等についての国民及び科学コミュニティの広い理解・支持	有	国民／科学コミュニティの理解
3 技術的成立性の明 確化	I L C 加 速 器 等	ア	ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討	有・学	技術課題
		イ	超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等	有・学	技術課題
		ウ	計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討	学	リスク
	土 木 工 事 及 び 環 境 ・ 安 全 対 策	ア	様々な場合を想定した地下水浸水対策、耐震設計を含めた地震や火災などの不測の事態への対策についての経費算定も含めた計画	有	土木
		イ	大量の掘削残土の処理方法や処分場所の確保	有	環境／安全
		ウ	大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の検討と対策	有	土木
		エ	坑口周辺や掘削残土の捨て場など環境調査や土砂災害対策	有・学	環境／安全
		オ	放射線防護対策、放射化物の長期維持管理の検討及び地域住民の理解	有・学	環境／安全
		カ	広範な地下水位低下の可能性も考慮した環境影響評価方針の明確化	有・学	環境／安全

文科省指摘課題					分類
4 コスト見積もりの 妥当性		ア	現時点での未計上の経費の算定や経費負担の在り方	学	コスト
		イ	追加経費発生リスク（技術、工期延長、市場等）への十分な留意	有	コスト
5 人材育成・確保の 見通し		ア	全体調整を担う指導的人材や総合指揮を執る加速器研究者	学・有	人材
		イ	国内の人材の所在の把握や人材育成計画の検討	学・有	人材
		ウ	供給可能な人材の量や時期を踏まえた国際分担	有	人材
		エ	外国人のための、住環境や家族の生活支援等を含めた環境整備の検討	有	外国人受け入れ体制
6 その他		ア	準備研究所にかかる体制等（現行の研究計画からリソースを移行する時期と範囲についてのKEKや国内外の関連研究者との議論など）	有	実施体制
		イ	技術的・経済的波及効果	学	波及効果

ILC 主な課題 WG (=ドラフト作成チーム)

「ILC計画に関する主な課題について（文科省提出文書）」

https://www2.kek.jp/ilc/wp-content/uploads/2021/07/20210602_ILC-kadai.pdf

ILC 主な課題 WG メンバー：

佐貫智行（東北大）、森俊則（東大）、山下了（東大）：JAHEP

道園真一郎、照沼信浩、藤井恵介：KEK

事務局：瀬戸勇紀、宮居美紗、山口陽（KEK 国際プロジェクト推進室）

課題が指摘されて以降の進展と見通しを**淡々と事実ベース**で記述した

「ILC計画に関する主な課題について（サマリースライド）」

<http://www.jahep.org/files/ILC20210719.pdf>

ILC 主な課題 WG メンバー：

- ・ 佐貫智行（東北大）、森俊則、山下了（東大） + **追加メンバー**：大谷航（東大）、川越清以（九大）、栗木雅夫（広大）、成田晋也（岩手大）吉岡瑞樹（九大）：JAHEP

- ・ 道園真一郎、照沼信浩、藤井恵介：KEK

（事務局：瀬戸勇紀、宮居美紗、山口陽（KEK 国際プロジェクト推進室））

言いたいこと：**「できることはやった。ここから先は準備研究所で資源措置されれば解決できる」**とのメッセージがストレートに伝わるよう要点をまとめた

課題とその回答の例

サマリースライドをベースに紹介

主な課題のリスト

有：有識者会議指摘事項、学：学術会議指摘事項

文科省指摘課題				分類	
1 国際的な研究協力 及び費用分担の見 通し		ア	非ホスト国の十分な貢献を含む現実的かつ持続可能な国際費用分担	有	国際費用分担
		イ	諸外国のサイエンスカウンシル等におけるプロジェクトの承認と各国政府の資金確保に向けた議論の進展	有	各国のSC議論と資金確保
		ウ	国際協力を前提とした人材の育成・確保等の明確な見通し	有	人材育成/確保
2 学術的意義や国民 及び科学コミュニテ ィの理解		ア	欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC誘致の意義の整理	学	誘致の意義
		イ	素粒子物理学分野における人材配置や予算配分を含めた議論や諸学問分野の大型計画も含めたILCの位置づけに関する議論	学	コミュニティ合意
		ウ	成果等についての国民及び科学コミュニティの広い理解・支持	有	国民/科学コミュニティの理解
3 技術的成立性の明 確化	I L C 加 速 器 等	ア	ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討	有・学	技術課題
		イ	超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等	有・学	技術課題
		ウ	計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討	学	リスク
	土 木 工 事 及 び 環 境 ・ 安 全 対 策	ア	様々な場合を想定した地下水浸水対策、耐震設計を含めた地震や火災などの不測の事態への対策についての経費算定も含めた計画	有	土木
		イ	大量の掘削残土の処理方法や処分場所の確保	有	環境/安全
		ウ	大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の検討と対策	有	土木
		エ	坑口周辺や掘削残土の捨て場など環境調査や土砂災害対策	有・学	環境/安全
		オ	放射線防護対策、放射化物の長期維持管理の検討及び地域住民の理解	有・学	環境/安全
		カ	広範な地下水位低下の可能性も考慮した環境影響評価方針の明確化	有・学	環境/安全

2. 学術的意義や国民及び科学コミュニティの理解

(ア) 欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC誘致の意義の整理【学】

当時の状況：当時この課題について、電子・陽電子ヒッグスファクトリーの科学的意義に関する研究者コミュニティの合意はあったが、ILC (線形)と電子型FCC (円形)を含むヒッグスファクトリーの比較に関するコンセンサスはなかった。

その後の進展：

- 欧州素粒子物理戦略2020では、ヒッグスファクトリーはILCと電子型FCCのみ言及された。
(中国のCEPCは独自計画として進行中)
- ILC (線形)、電子型FCC (円形) を含む将来加速器計画について、欧州素粒子物理戦略2020策定に際し、欧州だけでなく、アジア、北米も含めた世界の研究者による学術的観点からの整理が進展し、**ヒッグスファクトリーとしての性能は同等であるというコンセンサスができた。**

ILCと電子型FCCのヒッグスファクトリーとしての比較

- ILCは将来の**エネルギー拡張可能**
- 電子型FCCのトンネルは陽子型FCCに転用可能

「ILC+陽子型FCC」と「電子型FCCと陽子型FCC」の比較

- 前者なら**ILCにより電子型の将来性が担保**できるが、後者では電子型の将来が途切れる
- 陽子型FCCの実験開始も電子型を**ILCのみとする方が早まる**

ヒッグスファクトリーとしての詳細比較	ILC	電子型 FCC
形/大きさ	線形/全長約20km	円形/周長約100km
ヒッグスファクトリーとしての性能	○	○
加速器施設建設費	約5800億円	約10,500MCHF (現在のレートで約1.2兆円)
ヒッグスファクトリー実験開始(最速)	2030年代後半	2040年代後半
電子型のエネルギー拡張性	可能	—
陽子型への転用(トンネル再利用)	—	可能(ただし電子型は撤去)

※欧州素粒子物理戦略2020：①ヒッグスファクトリーが最優先、②FCC計画には大きな課題あり(今回は踏んだ提言をせず、次回(～7年後)欧州戦略までに技術的・経済的実現可能性の検討を行うことになった。)

将来拡張性および早期物理成果達成の観点から、ILC+陽子型FCCの組み合わせが世界の素粒子物理にとってベスト。**ILCによってベストなシナリオが実現できる。**

電子型FCC(=FCC-ee) に関するよくある誤解

- FCC-ee はルミノシティが高く、しかも2IPで実験できるので ILCよりヒッグスファクトリーとしての性能がより優れている。
- FCC-ee の加速器本体は安い。100km のトンネルは高いが、陽子型 FCC (=FCC-hh) に再利用できるので、電子・陽電子ヒッグスファクトリーとしてはILCより安価で経済的。
- FCC-ee はすぐにでも建設開始できる。

電子型FCC(=FCC-ee) に関するよくある誤解

- FCC-ee はルミノシティが高く、しかも2IPで実験できるので ILCよりヒッグスファクトリーとしての性能がより優れている。

→ **正しくは：ILC と FCC-ee はヒッグスファクトリーとしての性能は同等**

FCC-ee のルミノシティは ILC より高いが、FCC-ee にはない ILCの偏極ビームがこの差を補償結果としてヒッグス結合の決定精度をはじめとするヒッグスファクトリーとしての性能は同等

- FCC-ee の加速器本体は安い。100km のトンネルは高いが、陽子型 FCC (=FCC-hh) に再利用できるので、電子・陽電子ヒッグスファクトリーとしてはILCより安価で経済的。

→ **正しくは：FCC-ee 加速器本体は決して安くない！**

「FCC-ee + FCC-hh」と「ILC + FCC-hh」の建設費はほぼ同じ

FCC-ee 加速器施設はトンネルを除いても約6,000億円、土木を含めたILC加速器施設全体は約5,800億円
FCC-ee のトンネルは約6,000億円

- FCC-ee はすぐにでも建設開始できる。

→ **正しくは：FCC-ee はまだ概念設計段階**

トンネル建設費調達の目処も立っていない！

FCC-ee 加速器施設はトンネルを除いても土木を含めたILC加速器施設全体とほぼ同額

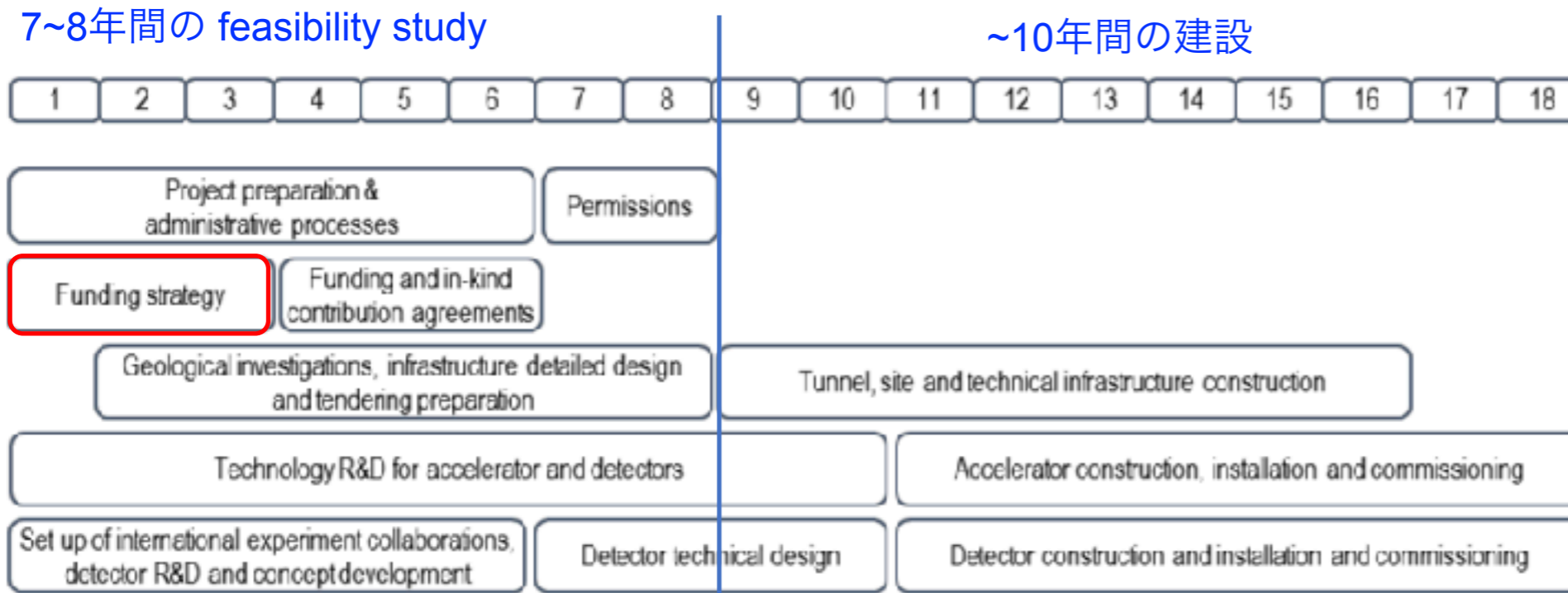
FCC(円形)の (FCC 推進者による) タイムライン

(1) 基本資料

- [19] Future Circular Collider - European Strategy Update Documents [CERN-ACC-2019-003] <http://cds.cern.ch/record/2653669/files/CERN-ACC-2019-0003.pdf?version=2>
- [20] Future Circular Collider - European Strategy Update Documents [CERN-ACC-2019-007] <http://cds.cern.ch/record/2653673/files/CERN-ACC-2019-0007.pdf?version=2>

(2) FCC推進者による電子型FCC建設のタイムライン [19]

計画承認/建設開始



ヒッグスファクトリー運転

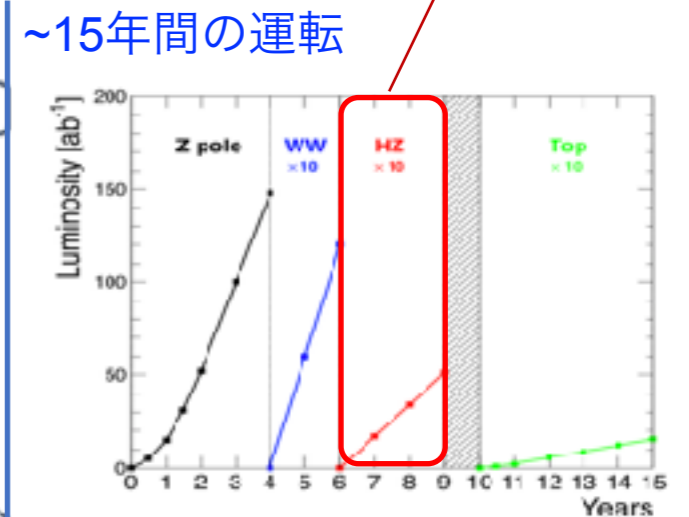


Figure 2: FCC-ee operation model showing the integrated luminosity in ab^{-1} , accumulated as a function of time in years at the Z pole (black), the WW threshold (blue), the Higgs factory (red) and the top-pair threshold (green). The hatched area indicates the shutdown time to prepare for the highest energy runs.

[19](6.2 節))

Figure 5: Overview of implementation timeline for FCC-ee, starting in 2020. Numbers in the top row indicate the year. Physics operation would start in 2039.

電子型FCC運転計画 [19](2.1 節))

欧州戦略2020の提言

FCCはトンネルだけで>6000億円

まずは funding strategy も含め次の欧州戦略更新 (~7年後) まで

feasibility study をせよ!

ヒッグスファクトリーとしての設計の成熟度

FCC: 2018年にCDR (TDRはまだない)

ILC: 2007年にRDR(CDR相当)

2013年にTDR

※ RDR=Reference Design Report
CDR=Conceptual Design Report
TDR=Technical Design Report

ヒッグスファクトリー運転は実験開始6年後

→ 最速でも2040年代後半

FCC(円形)の (FCC 推進者による) タイムライン

(3)FCC推進者による陽子型FCCを含めた全体タイムライン[20]

70年の計画

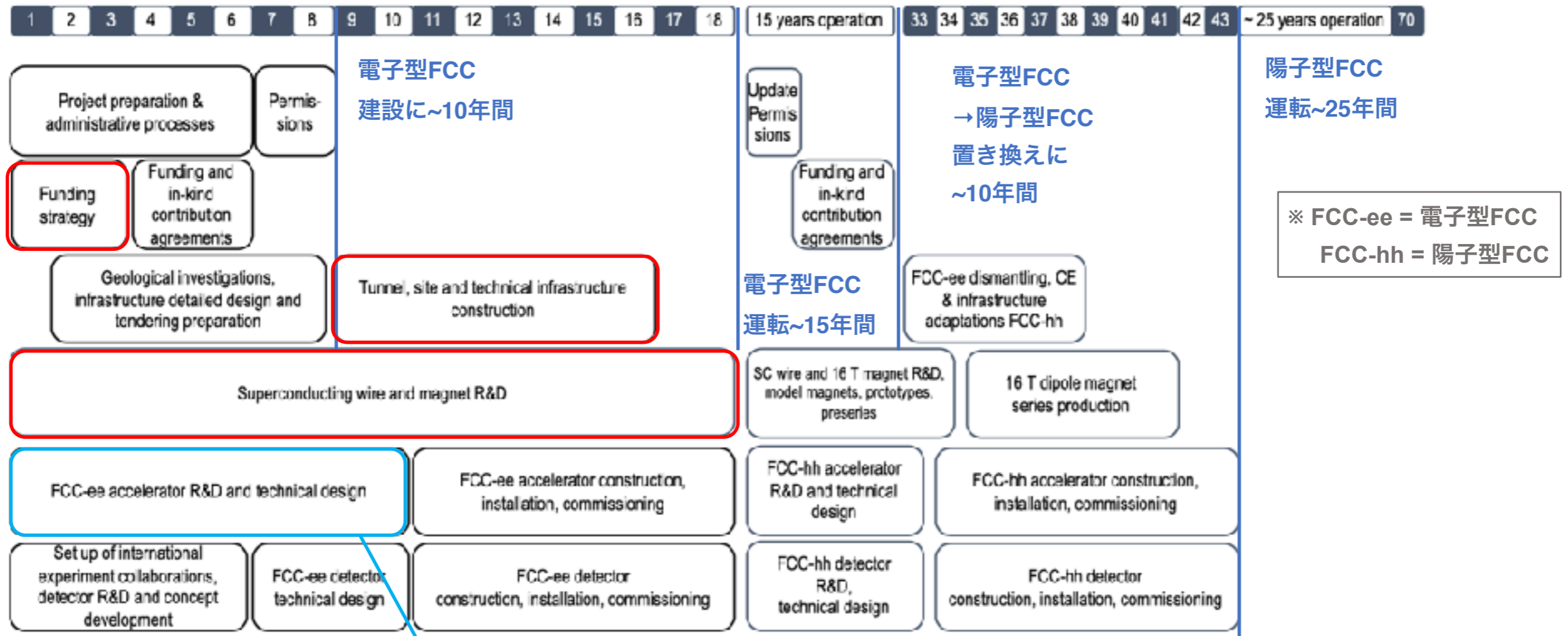


Figure 9: Overview of implementation timeline for the integral FCC program, starting in 2020. Numbers in the top row indicate the year. Physics operation for FCC-ee would start towards the end-2030s; physics operation for FCC-hh would start in the mid-2060s.

欧州戦略2020の提言

陽子型FCCのための高磁場超伝導磁石のfeasibility study をせよ！
(技術の目処が立っていない)

ヒッグスファクトリーとしての設計の成熟度
 FCC: 2018年にCDR (TDRはまだない)
 ILC: 2007年にRDR(CDR相当)
 2013年にTDR

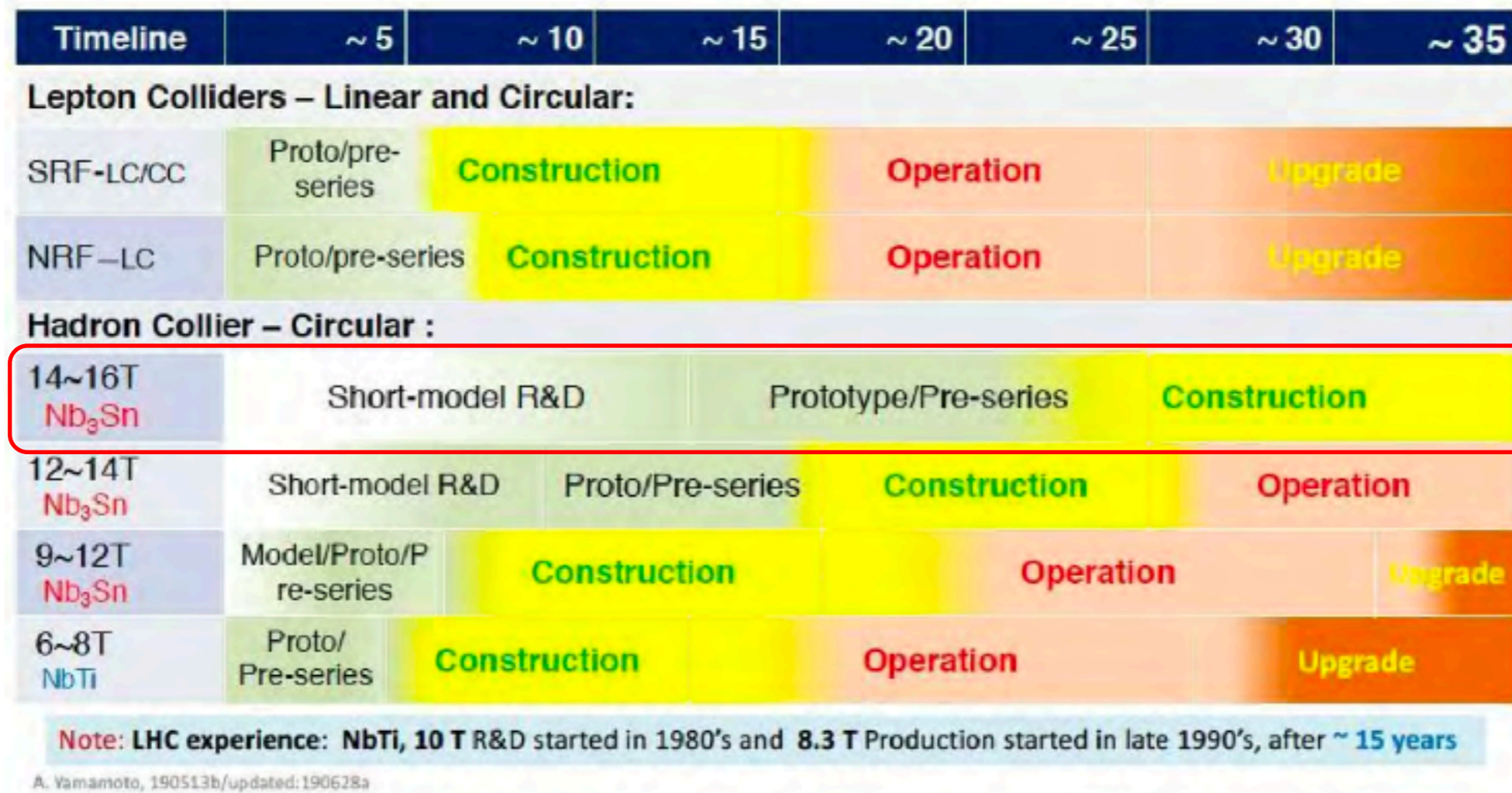
※ RDR=Reference Design Report
 CDR=Conceptual Design Report
 TDR=Technical Design Report

陽子型FCC実験開始

最速で2060年代半ば

By Akira Yamamoto from Physics Briefing Book (EPPS Preparatory Group)

<https://arxiv.org/abs/1910.11775>



陽子型 FCC

Fig. 10.4: A relative time-line expected for realizing future lepton and hadron colliders (from A. Yamamoto, presented at the Open Symposium in Granada, and updated based on the discussion that followed).

陽子型 FCC実現には、16Tの高磁場電磁石(HFM: High Field Magnet)が必要

→建設開始前に20年を超える開発研究が必要

→建設に約10年とすると、電子型をILCに任せ陽子型FCCのみ建設とした場合、陽子型FCC実験開始は最速(=HFM開発のみが律速)なら2050年代初め?

(FCC-ee を経由する場合は 2060年代半ば)

主な課題のリスト

有：有識者会議指摘事項、学：学術会議指摘事項

文科省指摘課題					分類
1 国際的な研究協力 及び費用分担の見 通し		ア	非宿主国の十分な貢献を含む現実的かつ持続可能な国際費用分担	有	国際費用分担
		イ	諸外国のサイエンスカウンシル等におけるプロジェクトの承認と各国政府の資金確保に向けた議論の進展	有	各国のSC議論と資金確保
		ウ	国際協力を前提とした人材の育成・確保等の明確な見通し	有	人材育成/確保
2 学術的意義や国民 及び科学コミュニテ ィの理解		ア	欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC誘致の意義の整理	学	誘致の意義
		イ	素粒子物理学分野における人材配置や予算配分を含めた議論や諸学問分野の大型計画も含めたILCの位置づけに関する議論	学	コミュニティ合意
		ウ	成果等についての国民及び科学コミュニティの広い理解・支持	有	国民/科学コミュニティの理解
3 技術的成立性の明 確化	I L C 加 速 器 等	ア	ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討	有・学	技術課題
		イ	超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等	有・学	技術課題
		ウ	計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討	学	リスク
	土 木 工 事 及 び 環 境 ・ 安 全 対 策	ア	様々な場合を想定した地下水浸水対策、耐震設計を含めた地震や火災などの不測の事態への対策についての経費算定も含めた計画	有	土木
		イ	大量の掘削残土の処理方法や処分場所の確保	有	環境/安全
		ウ	大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の検討と対策	有	土木
		エ	坑口周辺や掘削残土の捨て場など環境調査や土砂災害対策	有・学	環境/安全
		オ	放射線防護対策、放射化物の長期維持管理の検討及び地域住民の理解	有・学	環境/安全
		カ	広範な地下水位低下の可能性も考慮した環境影響評価方針の明確化	有・学	環境/安全

3. 技術的成立性の明確化

[1] ILC加速器等【有・学】(ア)(イ)(ウ)

※コストに関連することは4.(イ)でまとめて扱う

指摘された技術的成立性について、以下のような大きな進展があった。

世界の状況と課題への取組：

- ILCで使用される超伝導加速技術を用いたEuropean XFEL (ILCの10%規模) がFELユーザー運転を順調に続けている。また、同技術は米国LCLS-IIでも採用され、建設が続いている。これは同技術の高い信頼性を示している。
- 国際協力により、ILCに必要なナノビームをATF2で実現し、超伝導空洞の高電界・低損失、材料コスト低減という成果を得た。
- 世界の加速器施設で活躍する研究者で組織された国際推進チームIDT-WG2で、残された一部技術課題の解決にむけた準備研究所における計画を策定した。

準備研究所での取組：

- 策定された計画に基づき研究開発を行い、残された技術課題を解決する。
- 物納貢献における品質管理、整合性の担保は、国際間の取り決めでそのルールを決定する。

準備研究所における課題の例

WP-1：世界で120台の超伝導加速空洞を製造し、高性能空洞の歩留まりを評価・確認。

WP-2：クライオモジュール6台を分担製造し、海上移送の安全性と規格を確認。

WP-15：ナノビームを国際協力で実施しているKEK-ATFで最終収束系の最適化評価。



超伝導加速空洞



クライオモジュール

赤ハイライトは藤井による



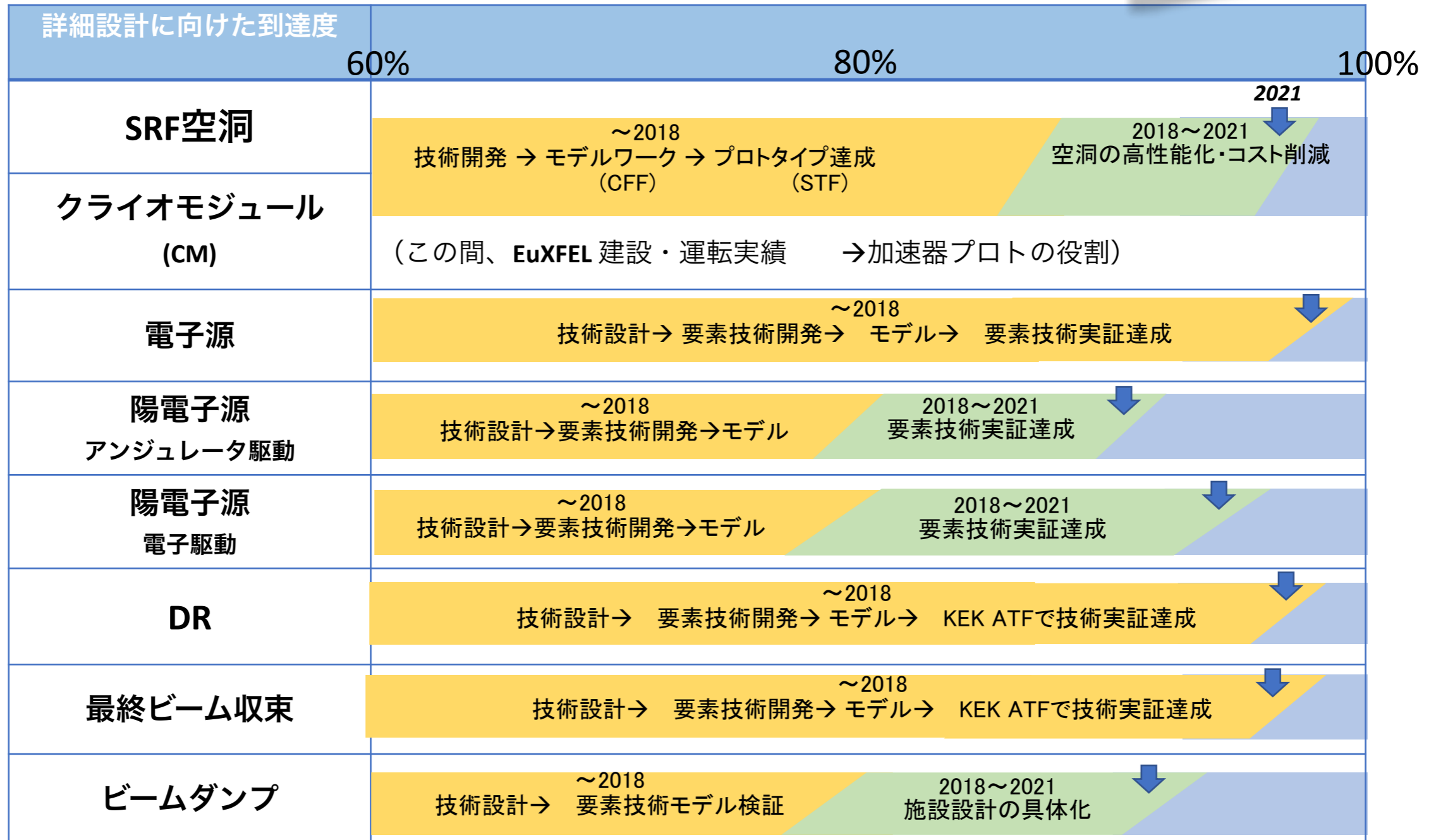
日本では、空洞評価設備やモジュール評価設備のような基盤設備の整備が別途必要。

ILC加速器準備達成度とPre-Labでの課題

2013年に技術設計書(TDR)を出版以降、鍵となる技術開発が進展し、

詳細設計を開始する準備が整いつつある。

詳細は道園さんのトーク



モデルワーク (モデル) : 小規模モデル、部分/要素モデル。
 プロトタイプ (プロト) : スケールが同じ規模での実証。
 実証機(実証) : 実機製造の為の (工業界への) 技術移転。

主な課題のリスト

有：有識者会議指摘事項、学：学術会議指摘事項

文科省指摘課題					分類
1 国際的な研究協力 及び費用分担の見 通し		ア	非宿主国の十分な貢献を含む現実的かつ持続可能な国際費用分担	有	国際費用分担
		イ	諸外国のサイエンスカウンシル等におけるプロジェクトの承認と各国政府の資金確保に向けた議論の進展	有	各国のSC議論と資金確保
		ウ	国際協力を前提とした人材の育成・確保等の明確な見通し	有	人材育成/確保
2 学術的意義や国民 及び科学コミュニテ ィの理解		ア	欧州の将来円形加速器への参加と比較した、ILC誘致の意義の整理	学	誘致の意義
		イ	素粒子物理学分野における人材配置や予算配分を含めた議論や諸学問分野の大型計画も含めたILCの位置づけに関する議論	学	コミュニティ合意
		ウ	成果等についての国民及び科学コミュニティの広い理解・支持	有	国民/科学コミュニティの理解
3 技術的成立性の明 確化	I L C 加 速 器 等	ア	ビームダンプ、電子源・陽電子源、ビーム制御、ダンピングリング、測定器等の目標性能の明確化と工程表の検討	有・学	技術課題
		イ	超伝導加速空洞の歩留まりや性能の向上、コスト検証、品質管理等	有・学	技術課題
		ウ	計画通り進まなかった場合の上昇コストとその対策の検討	学	リスク
	土 木 工 事 及 び 環 境 ・ 安 全 対 策	ア	様々な場合を想定した地下水浸水対策、耐震設計を含めた地震や火災などの不測の事態への対策についての経費算定も含めた計画	有	土木
		イ	大量の掘削残土の処理方法や処分場所の確保	有	環境/安全
		ウ	大量湧水があった場合の工事費用や工期への影響の検討と対策	有	土木
		エ	坑口周辺や掘削残土の捨て場など環境調査や土砂災害対策	有・学	環境/安全
		オ	放射線防護対策、放射化物の長期維持管理の検討及び地域住民の理解	有・学	環境/安全
		カ	広範な地下水位低下の可能性も考慮した環境影響評価方針の明確化	有・学	環境/安全

3. 技術的成立性の明確化

[2] 土木工事及び環境・安全対策【有・学】

当時の状況：有識者会議では議論の対象はTDRに限定され、学術会議では地質調査（ILC立地可能性評価に向けた北上山地地質調査報告書）および施設検討についての情報（ILC施設・電気設備と非常時安全対策の検討）を参考資料として提供するにとどまった。建設地を想定した基本設計は未完了であった。

これまでの取組と成果：

- 有識者会議・学術会議からの指摘を受け、これまでの検討結果を『東北ILC施設計画』（土木施設基本計画）として整理した。
- 『東北ILC施設計画』は、土木学会 岩盤力学委員会 ILC施設計画評価小委員会から、[ILC施設建設の“技術的成立性を担保している”](#)との外部評価を受けた（2020）

『東北ILC施設計画』の主な内容

- 実際の地形地質によるルート設定
- 地形や地表の環境を考慮した地上施設（坑口）配置
- 国交省土木工事積算基準に準拠したトンネル設計
- 地形に合わせた施工計画
- 地下水排水設備の自然流下による実装
- 国交省土木工事積算基準に準拠した工程・工期、およびコスト算定

準備研究所での取組：

建設に向け、大規模調査・測量、設計、及び発注図書の整備（施工計画作成・積算）を行い、発注可能な状態にする。