### 技術的成立性・コスト (加速器関連)

#### 資料「ILC計画に関する主な課題について(2021.7.19a)」の補足説明

KEK加速器研究施設 応用超伝導加速器センター(CASA)

/ IDT-WG2

道園真一郎

#### 加速器関連の指摘事項抜粋

技術的成立性の明確化

- (1)ILC 加速器等
- 前回報告書取りまとめ以降、加速器等の技術的課題の解決に向けてどのような取組が進められたか。また、加速器等の技術的成立性に進展はあったか。
   (加速器物品等のプロトタイプの製作や試験を行う前に解決すべき課題の状況等)
- 準備段階で解決すべき課題について、ワークパッケージで示されている計画(解決すべき隘路、それに対するアプロー チ等)が妥当であるか。
- 現状について、加速器等の技術的成立性が明確であると言える状況にあるか。
- ○前回の有識者会議報告書(2018.7)や日本学術会議の所見(2018.12)において指摘している技術的課題の全ての事項について、①前回報告書とりまとめ以降の進捗(新たに得られた知見等)、②実際の製造、建設までに解決する必要がある課題を資料(一覧表等)にまとめていただきたい。

#### コスト見積もりの妥当性

- ○前回報告書取りまとめ以降、コスト見積もりに関してどのような取組が行われたか。また、コスト見積もりの妥当性に進展はあったか。(ILC加速器、施設・設備、周辺整備、土木工事及び環境・安全対策等に関する必要経費の網羅性や見積もりへの最新の知見の反映等)
- 現状について、コスト見積もりは妥当であると言える状況にあるか。

資料2-4

### 250GeV ILC概略



加速器システムはエリアごとに独立にモジュール化 電子・陽電子源、ダンピングリング、主加速器、ビーム伝送(最終収束)、ビームダンプ

電子・陽電子源、ダンビンクリンク、主加速器、ビーム伝达(最終収束)、ビームダンノ 	項目	パラメータ
	衝突エネルギー	250 GeV
CEAN POPULATION AND A CONTRACTOR OF A CONTRACT	長さ	20 km
重要な技術	ルミノシティ	1.35 x10 <sup>34</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
few GeV	繰り返し	5 Hz
Kelt ナノビーム	ビームパルス幅	0.73 ms
damping K extraction	ビーム電流	5.8 mA (in pulse)
ring few 超伝導加速技術 0-500 GeV final focus & dump	衝突点ビームサイズ	7.7 nm@250GeV
	超伝導空洞の電界	31.5 MV/m
bunch main linac collimation	空洞のQ値	(35  MV/m) $Q_0 = 1 \times 10^{-10}$

## ILC技術準備状況

2007年に概念設計書(RDR)、2013年に技術設計書(TDR)が出版された。

これまで建設開始に向け技術開発が順調に進展し、今後の課題についても解決の道筋がついたと考えている。

準備状況	(RDR) (TDR)	2021 (EDR)*
SRF 空洞, CM	~2017 技術設計・開発 → モデルワーク** → プロトタイプ実証	2018~2021 空洞の高性能化・コスト削減 国際分担・量産実証・移送実証
SRF 線形加速器	**モデルワーク(モデル)∶小規模モデル、部分/要素モデル。	European XFEL ユーザー運転
電子源	~2017 技術設計→ 要素技術開発→ 要素技術写	実証達成 Pre-Lab 技術確認 Ⅱ C
<b>陽電子源</b> アンジュレータ方式	~2017 技術設計→要素技術開発	2018~2021     Pre-Lab       要素技術実証     回転標的・磁気収束技術確立
<b>陽電子源</b> 電子駆動方式	~2017 技術設計→要素技術開発	2018~2021         Pre-Lab         2           要素技術実証         回転標的・捕獲空洞技術確立         ー
ダンピングリング	~2017 技術設計→ 要素技術開発→ KEK ATFで技	Pre-Lab    支術実証
最終ビーム伝送	~2017 技術設計→ 要素技術開発→ KEK ATFで技	<mark>↓ Pre-Lab</mark> 支術実証 安定運転技術確立
ビームダンプ	~2017 技術設計→ 要素技術検証 設	2018~2021 Pre-Lab 逸備設計の具体化 遠隔保守技術確立
	:~2017年 :2018年~2021年	*EDR:建設開始に必要と なる詳細技術設計書

: Pre-lab

66 <sub>3</sub>

### 超伝導高周波(SRF)技術の進展



*→詳細資料: P.21-23,31,35,52* 

## 超伝導高周波技術の国際協力



#### <u>2018 ~2021の進展</u>:

- 日米協力による安定した電界 E > 35 MV/m 技術の達成
  - Nb 材製法・特性の向上
  - 表面処理技術の向上
    - 低温(10~20C) 電解研磨
    - 2段階ベーキング (75C and 120C)
  - 冷却スピードの最適化(flux expulsion)
- 日独・日仏協力による空洞製造効率化・防塵作業自動化
- ビーム加速実証
  - KEK-STF、33 MV/mの実証
- 高電界クライオモジュール (HGC, 米国FNAL)(進行中)
  - 38 MV/mの実証を目指す
- ILC Pre-Lab での実証計画:
- 量産準備:3領域での国際的統計の実証

**KEK-STF** 







空洞周波数測定装置 (空洞製造工程の品質確保)



zatech

he detailed cleaning process is described in chart (Irfu)

Simulation of the process in Virtual Reality (the gov was to check the usability of the new semi-automat tool in cleanroom environment



### ILCとEuropean XFEL

8~9個の空洞を収めたクライオモジュール(CM)が加速器トンネル内に繰り返し並べられる。



→詳細資料:

P.23







→詳細資料: P.27,33,37

## 最終収束の進展





を十分下回ると算定。

ビームダンプの進点
-----------

*→詳細資料: P.30,33,37* 



## ILCに関連する国際的な取り組みの例

→詳細資料:	
P.22,34	

	~2017	2018~2021
CERN	<ul> <li>ATFでのナノビーム協力</li> <li>SRF空洞・クライオモジュール工業化検討</li> <li>冷凍機・ビームダンプ・土木設計協力</li> </ul>	<ul> <li>ATFでのナノビーム協力、SRF空洞製造技術、冷凍機・ ビームダンプ・土木設計協力</li> <li>ヨーロッパのILC研究開発全体取り纏め</li> </ul>
アメリカ地域 (アメリカ、カ ナダ)	<ul> <li>LCLS-II 建設</li> <li>LCLS-II用の新SRF空洞処理方法の開発</li> <li>HL-LHC用クラブ空洞開発</li> </ul>	<ul> <li>SRF空洞、高性能化・コスト削減の日米協力</li> <li>LCLS-II用クライオモジュールの技術開発、建設</li> <li>米・カナダによるHL-LHC用クラブ空洞の物納貢献</li> </ul>
フランス	<ul> <li>欧州XFELでのSRF入力カプラー、モジュールの組立て実績</li> <li>ATFでのナノビーム協力</li> </ul>	<ul> <li>欧州中性子源(ESS)、米国PIP-IIプロジェクトへの物納貢献</li> <li>SRFの空洞高性能化。ATFナノビーム協力</li> </ul>
ドイツ	<ul> <li>TESLA計画(ILCの前身)の推進</li> <li>2007から欧州XFELの建設</li> <li>TDRのSRFコスト見積もり</li> </ul>	<ul> <li>欧州XFELの安定運転による大型SRF加速器の実証</li> <li>SRF空洞高性能化</li> </ul>
イタリア	<ul> <li>空洞、クライオモジュール、チューナー設計 (TDR)</li> <li>欧州XFELでの空洞・クライオモジュールの半 数製造</li> </ul>	<ul> <li>欧州中性子源(ESS)、米国PIP-IIプロジェクトへの物納貢献</li> <li>ドイツのBESSY storage ringの空洞チューナー設計</li> </ul>
スペイン	<ul> <li>ATFでのナノビーム協力</li> <li>欧州XFELの超伝導電磁石など物納貢献</li> <li>日本のIFMIF(六ケ所)への物納貢献</li> </ul>	<ul> <li>・ 欧州中性子源(ESS)への物納貢献</li> <li>・ ILC超伝導マグネット技術開発(予算獲得)</li> </ul>
イギリス	<ul> <li>ATFナノビーム協力、ダンピングリング</li> <li>陽電子源、ビーム伝送、高周波源、ビームダン プのTDRへの貢献</li> </ul>	<ul> <li>欧州中性子源(ESS)、米国PIP-IIプロジェクトへの物納貢献</li> <li>LHCクラブ空洞の設計、技術開発</li> </ul>

詳細資料: <u>https://doi.org/10.5281/zenodo.5535621</u>

### 技術課題に関する取り組み

有識者会議や学術会議で指摘された技術的課題などについてIDT-WG2で、「技術課題提案書」に世界で 分担するワークパッケージ(WP)としてまとめた。次のステップとして、超伝導空洞の世界3領域で量産実証 など国際協力で実施するため、追加予算が必要となる。



**75**<sub>12</sub>

*→詳細資料:* P.34-37

## WP-1: 空洞量産実証

*→詳細資料:* P.34-37

超伝導高周波技術は同タイプの空洞を利用しているEuropean XFELの運用中で成熟してきている。 近年は日米・日欧協力で空洞高性能化・コスト削減に取り組む。これらを含めた歩留まりを評価。



WP-2: クライオモジュール組立・移送・性能保持 →詳細資料: P.34-37

超伝導高周波技術は同タイプの空洞を利用しているEuropean XFELの運用中で成熟してきている。 空洞を収納するクライオモジュールの組立・移送し性能保持を確認する。





### KEKのILC研究開発拠点

ヨーロッパ、アメリカにはEuropean XFELやLCLS-IIでの超伝導加速器評価用基盤設備が整っているが、日本では追加基盤設備が必要。KEKの3つのSRF研究開発拠点のうちCOI棟を中心に基盤設備整備を進める。



### SRF基盤設備整備

COI棟にはSRF関連の最新設備が導入されており、さらに必要となる基盤設備を追加整備する。約29億円



コスト見積もりの妥当性(加速器)

*→詳細資料: P.38-52* 

〇前回報告書取りまとめ以降、コスト見積もりに関してどのような取組が行われたか。また、コスト見積もりの妥当性に進展はあったか。(ILC 加速器、施設・設備、周辺整備、土木工事及び環境・安全対策等に 関する必要経費の網羅性や見積もりへの最新の知見の反映等)

〇現状について、コスト見積もりは妥当であると言える状況にあるか。

#### これまでの検討結果

加速器システムの部品は独立化・モジュール化され、その多くは実用に供されており、LHCや SuperKEKBをはじめこれまでの大型加速器での経験も豊富にある。

- ILCの中核となる超伝導高周波加速器については、European XFELではILCで使う台数の10%に相当する 数の加速空洞が実装され、加速器の運用が開始されており、コストの分析も進んでいる。
  - ●ILC 加速器建設費の見積は、2008年に調整されたEuropean XFEL建設当初予算(TDR-adjusted)および2011年ま での入札実績が反映された\*。
  - •XFEL建設は、2008年の当初予算に、2012年および2015年に認められた追加予算を加えた範囲内で2017年に完成している。(2008年比で+13%、2012年比で+6%)\*
  - •コスト増の主な原因は「土木・建築費の好況による一時的価格高騰」と「建設遅延(1年以内)による労務費増加」\*
  - •ILCで想定しているコスト不定性(25%)、コンティンジェンシー(10%程度)の範囲に収まる。
  - •ILCの超伝導加速器部分はEuropean XFELと比べて空洞数が約10倍で、約8%の単価減に相当\*。
  - ●超伝導空洞の歩留まりが(仕様の90%から)80%に留まった場合、建設コスト比で約1%のコスト増\*\*。

#### 準備研究所における取組

- TDRでのコスト見積もりはバリー・バリッシュ氏をディレクターとする研究者組織GDEで行われ\*\*\*、国際的なレビューで評価された。本格的なコストの再確認は国際協力により準備研究所で取り組む。
- 準備研究所で毎年コストレビューを行い、<u>コスト変化に迅速に対応</u>する。

<u>\* P.50, 51参照、\*\* P.52参照、\*\*\* P.42-48参照</u>

## **International Cost Review (2013)**

#### ILC TDR cost under review

#### Barry Barish | 7 March 2013



The ILC international cost review was carried out at Oakley Court in Windsor, UK, where the "Rocky Horror Picture Show" was filmed in 1975.

The final deliverable of the Global Design Effort, the ILC *Technical Design Report*, was completed and submitted in draft form to the International Linear Collider Steering Committee (ILCSC) in November 2012. Following a successful technical review in December, <u>an international cost review of the</u> TDR ILC value estimate was chaired by Norbert Holtkamp of SLAC in February. The total TDR value estimate averaged over the three regional sites is 7.8 BILCU (Jan 2012 US\$), plus an explicit labour estimate averaged over the three regional sites of 23 million person-hours. The international cost review validated these TDR value estimates, as well as pointed out other costing that will be needed as the ILC becomes a site-specific construction project.

Costing international projects, like the ILC, is a particularly challenging undertaking. The project will involve the collaboration of countries from around

the world that all have different traditions and conventions for planning and cost-estimating large projects. The "value" methodology, which we have adopted for the ILC, is independent of any particular country-specific system, while being compatible with conversion to any such system. Value is an especially useful concept for dividing up a project where collaborators mostly contribute equipment "in kind," because of the large differences in manufacturing costs and in labour rates around the world. Converting value estimates to country costing is accomplished by adapting to the local costing practices.

### まとめ

- 2007年に概念設計書(RDR)、2013年に技術設計書(TDR)が出版された。
- これまで建設開始に向け技術開発が順調に進展し、今後の課題についても解決の
   の道筋がついたと考えている。
- 日米協力・日欧協力により、超伝導空洞の高性能化・コスト削減の取り組みが進んでいる。
- 有識者会議や学術会議で指摘された技術的課題などについてIDT-WG2で、「技術 課題提案書」に世界で物納貢献するワークパッケージ(WP)としてまとめた。
- ILCでは世界3極での空洞製造分担を想定しており、超伝導高周波(SRF)について
   の量産実証が重要な次のステップ。
- ILCの中核となる超伝導高周波加速器については、European XFELではILCで使う 10%に相当する数の加速空洞が実装され、加速器の運用が開始されており、コスト の分析も進んでいる。



#### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等(超伝導高周波技術)

*→関連: P.4,5,31,35* 

#### 有識者会議・学術会議の指摘

- 超伝導高周波加速管の加速勾配の設計基準値は、現時点での達成可能な技術レベルに基づいて 35 MV/m とされている。これを確実に歩留まり良く実現することは必須であり、更なる性能向上も望まれる。(学術会議 p.7)
- 数多くの超伝導高周波加速管が、参加各国の分担によりインカインド(現物)で供給されることが 想定されていることから、それらの整合性の担保を含む品質管理は重要なポイントとなろう。(学 術会議 p.7)
- 設計性能の確実な歩留まりでの実現と更なる性能向上(有識者会議、2021年7月29日)
- 参加各国から現物供給される超伝導高周波加速管の品質管理(有識者会議、2021年7月29日)

#### 2017年までの達成状況

- ヨーロッパを中心とした国際協力によりEuropean XFEL(ドイツ、ハンブルグ)が建設され、運転も開始された。
- ここでは、ILCと同じ型の超伝導空洞が約800個使用されている。
- European XFEL量産実績では、ILC 仕様歩留まり(90%)に対して≥ 83 %まで到達して いる。

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等(超伝導高周波技術)

*→関連: P.4,5,11,31,35* 

2018年以降の進展

- 2018年からは、空洞の性能向上とコストダウンに注力している。
  - 日米ディスカッショングループのもと、日米協力による性能向上・コストダウンの開発が進められている(2018年度~)。
  - 空洞電界向上(空洞台数の減少)・空洞のQ値向上(冷凍機負荷の低減)を実現する新たな表面処理方法が米国で開発された(窒素インフュージョン、2ステップベーキングなど)。
  - 米国技術を基に35MV/mを超える表面処理を行った空洞をKEKの加速器で長期試験中。
  - ニオブ空洞材料のコスト削減に向けた研究開発をKEKが主体となって実施中。
  - 国際協力によりILC仕様を超える38MV/mの空洞を集めたクライオモジュール組立てが米国フェ ルミ研究所で進行中。
  - 日独・日仏協力による空洞製造効率化・防塵作業自動化の研究開発が(2020年度より)進行中。
- European XFELが完成し順調に運用中、国際的な整合性・品質管理が実証された。米国ではLCLS-II がほぼ完成。(中国ではSHINE建設も進行中)
- 国際的に分担する空洞やクライオモジュール(CM)の規格をIDT-WG2(加速器)で確認。特に「高圧ガス保安・安全」に適合する最終設計について、国内での検討と共に海外の研究者とも調整中。

ILC-Prelabで行うこと(設計・開発から実証へ)

- 上記の取り組みの結論を踏まえて、国際協力により実証を進めていく予定
  - WP-1: 欧州、米州、アジア(含日本)にて、各40台の空洞製造・性能(歩留まり)実証
  - WP-2: 同様に各2台のCM を製造し、領域間での輸送後、連結・組み替えを経た性能保持の実 証

27

### 欧米で運転中または建設中の超伝導加速器 <sup>→ 縲縲</sup>

European XFELとILCは使用される空洞、高周波システムなど共通部分が多い。 European XFELではユーザー運用が続いている。

	European XFEL	LCLS-II (LCLS-II-HE)	ILC250
エネルギー	17.5GeV	3.3 - 4.0 (3.3 - 8.0) GeV	125GeVx2
空洞のタイプ		1.3GHz 9セル空洞	
空洞の数	776	304 (416)	~8,000
空洞電界	23.6MV/m	<16.0 (20.8) MV/m	31.5MV/m
モジュールの数	97	35 (55)	約900
バンチ電荷	≤1nC	最大0.3 nC	3.2nC
バンチ数	2,700 / pulse	929 kHz (max. bunch rep. rate)	1,312/pulse
ビームパルス長	0.65ms	連続	0.73ms
繰り返し	10Hz	連続	5Hz
運転開始	2017年~	<b>2022年~</b> (2027年~)	計画中

- European XFELとILC250は運転電界が異なるが、それ以外はほぼ同じ構成(高周波源、 クライオモジュールなど)である。
- European XFELは、TESLA計画(ILCの基となった電子・陽電子リニアコライダー)で開発された技術を活用している。LCLS-IIもTESLA技術を採用している。

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等(陽電子源)

#### 陽電子源の二方式の比較

#### 有識者会議・学術会議の指摘

- 多くの開発要素を含む2案が併記されている陽電子源について開発コストも考慮した方針の明確化。 (有識者会議、2021年7月29日)
- ILC陽電子源としてはアンジュレータ方式と電子駆動方式の二つの案がある。
  - アンジュレータ方式は偏極(30%)が得られるが、いままでにない新しい方式。
  - 電子駆動方式は従来型で技術的には確実な方式。
- 物理的な偏極陽電子のポテンシャルを考慮し、電子駆動方式とアンジュレータ方式の開発を並行。
- Positron Working Group によりReport on the ILC Positron Sourceがまとめられた。(2018年5月) https://bib-pubdb1.desy.de/record/418711/files/document.pdf
- ・ 開発コストは、アンジュレータ方式は1.5億円\*、10人・年、電子駆動方式は4.4億円\*、5人・年である。
- 開発研究の成果を見極めるため、方式の確定は準備研究所の3年目で実施する。
- 準備研究所での開発研究としては
  - アンジュレータ方式:ターゲットおよび磁気収束の詳細設計、これらの部分的プロトタイプの製作・試験。
  - 電子駆動方式:ターゲット、捕獲空洞のプロトタイプの製作と大電力試験、そのためのパルス電源、高周波源のプロトタイプの製造、磁気収束とターゲット・プロトタイプの組み合わせ試験。

\*IDTではILCU(2013年の1ドル)で計算。



#### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (アンジュレータ型陽電子源) → 関連: P.7,32,36

#### 有識者会議・学術会議の指摘

- 陽電子源で想定されているヘリカルアンジュレータ方式では、アンジュレータから放射されたガンマ線を照射して陽 電子を生成するターゲットの熱負荷対策や、不具合の生じた放射化しているターゲットの交換方式などがまだ開発 途上の技術であり、開発コストも含めて技術の選択を行うべきである。(有識者会議 p.42)
- 陽電子源のヘリカル・アンジュレータ方式は技術的に未経験で多くの開発要素を含んでいる。(学術会議 p.7)
- 準備期間において、回転ターゲットのプロトタイプ作製と陽電子源直後の磁場による収束系開発を進め、準備期間の2年目までにはどちらの方式を採るか技術選択行う必要があるとしているが、開発コストも考慮して方針を明確にすべき。(学術会議 p.7)

#### 2017年までの達成状況

- ヘリカルアンジュレータについては必要な磁場を出すプロトタイプが以前に製作され良好な結果を得ている。
- ターゲットの厚さなどの再検討で、熱負荷が半分以下になることが判明した。

#### 2018年以降の進展

- 放射光施設 APS (米国ANL)で超伝導ヘリカルアンジュレータを運用(2017年から)
- European XFELで長大アンジュレーター(91x5m)が利用され、設置誤差・軌道補正などアンジュレーター陽電子源で必要な技術が蓄積されている。
- ターゲットのチタン合金の耐久性試験が行われ、良好な結果を得た。IDT-WG2ではハンブルグ大学が 中心となって輻射冷却型ターゲットの詳細設計を進めている。

88 25

- 磁気収束としてパルスソレノイドの設計が進んでいる。
- 電子駆動型陽電子源で開発されるターゲット交換システムを利用する。

#### ILC-Prelabで行うこと(設計・開発から実証へ)

- 輻射冷却型ターゲットおよび磁気収束装置の最終設計
- これらの装置の部分的プロトタイプの製作・試験

#### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (電子駆動型陽電子源)



#### 有識者会議・学術会議の指摘

- 陽電子源の従来型ターゲット方式は所定のビーム強度を安定的に得ることは決して容易な達成目標ではない。(学術会議 p.7)
- 準備期間において、回転ターゲットのプロトタイプ作製と陽電子源直後の磁場による収束系開発を進め、準備期間の2年目までにはどちらの方式を採るか技術選択行う必要があるとしているが、開発コストも考慮して方針を明確にすべき。(学術会議 p.7)

#### 2017年までの達成状況

- 電子駆動型陽電子源についてはKEKと広島大学、早稲田大学、ロシアBINP研究所が中心となって 研究開発に取り組んできた。
- 概念設計が終わり、技術設計に取り組むとともに、ターゲットについての試験を検討。

#### 2018年以降の進展

- 磁性流体真空封止による回転ターゲットは、放射線照射による封止部の劣化試験、模擬ターゲットの 長期ランニング試験を行い、安定回転と充分な真空封止性能を確認した。
- 磁気収束回路については、BINPの実績に基づいた、フラックスコンセントレータの電磁設計を完成、 現在熱設計を進めている。
- ビーム収束部分の捕獲空洞については、安定性の高いAPS空洞を設計し、ビーム負荷による電圧補 償法を確立した。

#### ILC-Prelabで行うこと(設計・開発から実証へ)

- 主要コンポーネント(回転ターゲット、磁気収束回路、APS空洞)のプロトタイプを使った大電力試験、組み合わせ試 験により、長期運転による信頼性の向上。
- 放射化したターゲットの交換システムの詳細設計を進める。

### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等(ダンピングリング)



#### 有識者会議・学術会議の指摘

- ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。(有識者会議 p.5,12)
- 目標性能を達成するためのビーム制御やダンピングリングの技術の確立(有識者会議、2021年 7月29日)

#### 2017年までの達成状況

- ILCダンピングリングの入出射システムの高速キッカーシステムの技術設計ができた。
- KEKのATFにおいて、設置場所の制約によりビームとのタイミング制御を含めた入出射システムとしてのビームキックの長期安定性試験は出来ていないが、ILCダンピングリングで使用予定の高速キッカーシステムを使った入出射システムの原理実証ができた。

#### 2018年以降の進展

- SuperKEKBなど最新リング加速器で高性能ビーム技術の熟成してきている。
- LBNL次世代放射光施設におけるSwap-out入射や、CLICダンピングなど、近年高速キッカーの 研究開発が進んでいる。

#### ILC-Prelabで行うこと(設計・開発から実証へ)

- TDR以降、他の加速器で開発されている高速キッカー技術を含めILCダンピングリングの入出射 システムをより高性能なものへ高度化。
- ATFで国際協力によりILC高速キッカーのビームキックの長期安定性試験を行なう(WP-14)。

3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (ビーム伝送システム)



#### 有識者会議・学術会議の指摘

- ビームダンプや陽電子源、電子源、ビーム制御、ダンピングリングの入出射システム等についてはいまだ課題が多い。(有識者会議 p.5,12)
- ビーム収束及び位置合わせに関する制御・フィードバック系に関する技術の確立や、衝突点サイトにおける常時微細動の許容レベルに関する定量的評価が必要。(学術会議 p.7)
- 目標性能を達成するためのビーム制御やダンピングリングの技術の確立(有識者会議、2021年 7月29日)

#### 2017年までの達成状況

- KEKのATFではナノビーム技術(ビームサイズ、位置安定化)開発を国際協力で進めた。
- ビームサイズは2016年にはバンチ内粒子数1x10<sup>9</sup>個のビームに対して41nm(ATFのゴール値は 37nmでILCの7.7nmに相当)まで収束。尚、ILCの設計バンチ内粒子数(2x10<sup>10</sup>)でのビーム誘起電 磁場(Wakefield)の影響は、ATFにおける(1-2x10<sup>9</sup>)と等価。
- 位置安定性は多バンチでの安定化に必要な短時間でのフィードバック(仕様の366ns以下を満た す133ns)を実現。
- 花崗岩のような硬い岩盤に立地すれば常時微動は許容値を十分下回ると算定。

#### 2018年以降の進展

- ATFでのビームサイズのビーム誘起電磁場(Wakefield)の影響評価により、ILCでのWakefield抑 制にも目処。
- ATF国際レビュー(委員会)\*において、今までのATFの成果が高く評価され、また、ILC最終収束の詳細設計に資する研究継続の重要性が指摘された。(\*https://agenda.linearcollider.org/event/8626/)

#### ILC-Prelabで行うこと(設計・開発から実証へ)

 国際協力によりWakefield 源となるビームダクトの改造やビームモニターの増設等のATF高度化 ビーム収束及び位置合わせの長期安定化試験を実施(WP-15)。



### 土木学会Report /2008.3

常時微動とビーム軌道の安定性

#### 花崗岩のような堅い岩盤に立地すれば常時微動は許容値を十分に下回ると想定できる。



観測点	所在地	地質	土被り
KEKBトンネル	茨城	沖積層	<10 m
KEKB実験室	茨城	沖積層	<10 m
Spring-8	兵庫	変斑レイ岩	-
新発田	新潟	頁岩	25 m
広野	福島	花崗閃緑岩	-
朝日	愛知	花崗岩	50m
背振	福岡	変成岩	-
泊	青森	安山岩	14 m
国頭	沖縄	砂岩	30 m

#### 常時微動観測点の地質条件

### 3. 技術的成立性の明確化 [1] ILC加速器等 (ビームダンプ)



#### 有識者会議・学術会議の指摘

- 特に、ビームダンプについては、衝突エネルギーが500GeVから250GeVになったことで、設計の尤度は増加したものの、ハイパワーのビームを定常的かつ高い信頼性をもって受け続けられる窓の耐久性や窓の定期的な交換作業技術、耐震性能等を含め、本準備期間においてダンプシステムとして技術を完成させる必要がある。(有識者会議 p.42)
- 窓材の健全性モニタリング、遠隔操作による交換作業システムの具体的設計、高エネルギービームと水との反応
   で起こる事象の詳細については、準備期間に十分な検討が進められなければならない。(学術会議 p.7)
- 窓の耐久性,定期交換技術,耐震性能等を含むビームダンプシステム技術の完成や放射性物質の漏出事故への備え

#### 2017年までの達成状況

ILCビームダンプの基本設計は、米国SLAC研究所の2.2MW水ダンプをもとに欧米の研究者が中心となり取りまとめていた。KEKは2016年からその再検証を進めていた。

#### 2018年以降の進展

- 国内外の高出カビームダンプ・標的の視察と担当者との協議・連携を継続
  - J-PARC(中性子、ミューオン標的)、SLACおよびJLAB(水ダンプ)、CERN(LHCビームダンプ)、
  - RADIATE(高出カビーム標的・ビームダンプの国際研究コラボレーション)
- KEKの下でビームダンプ設計の再検証を継続
  - ビーム窓の熱・応力、ビーム入射によるダンプ水でのキャビテーション・衝撃波の評価
- 発生するミュー粒子を含む放射線遮蔽体の設計の具体化
- ダンプ水(循環水)設備の基本設計、ビームダンプ地下空洞の基本設計:産学連携(先端加速器推進協議会)

次は主要部品(ビーム<u>窓</u>およびその遠隔交換システム等)のプロトタイプ作成・検証と、放射化するダンプ水の漏水対 策設計や耐震設計を含めたダンプシステムの詳細技術設計(安全設計)を行う段階である。

## 指摘事項に対する取り組みのまとめ(1)



エリア	指摘事項	これまでの進捗	今後の課題
超伝導	超伝導空洞の歩留まり良い実現と更な る性能向上(学術会議 p.7)	空洞電界向上(空洞台数の減少)・空洞のQ値向上 (冷凍機負荷の低減)を実現する新たな表面処理方 法が米国で開発された(窒素インフュージョン、2ス テップベーキングなど)。 米国技術を基に35MV/mを超える表面処理を行っ た空洞をKEKの加速器で長期試験中。 ニオブ空洞材料のコスト削減に向けた研究開発を KEKが主体となって実施中。 日独・日仏協力による性能向上・コストダウンの開 発が(2020年度より)進行中。	欧州、米州、アジア(含日 本)にて、各40台の空洞 製造・性能(歩留まり)実 証
	整合性の担保を含む品質管理(学術会 議 p.7)	European XFELが完成し順調に運用中、国際的な 整合性・品質管理が実証された。米国ではLCLS-II がほぼ完成。(中国ではSHINE建設も進行中) 国際的に分担する空洞やクライオモジュール(CM) の規格をIDT-WG2(加速器)で確認。特に「高圧ガ ス保安・安全」に適合する最終設計について、国内 での検討と共に海外の研究者とも調整中。	欧州、米州、アジア(含日 本)にて、各2台のCM を 製造し、領域間での輸送 後、連結・組み替えを経た 性能保持の実証

### 指摘事項に対する取り組みのまとめ(2)



エリア	指摘事項	これまでの進捗	今後の課題
アンジュ レータ 陽 源	ヘリカルアンジュレータ方式では、アン ジュレータから放射されたガンマ線を照 射して陽電子を生成するターゲットの熱 負荷対策や、不具合の生じた放射化し ているターゲットの交換方式などがまだ 開発途上の技術であり、開発コストも含 めて技術の選択を行うべきである。(有 識者会議 p.42) 陽電子源のヘリカル・アンジュレータ方 式は技術的に未経験で多くの開発要素 を含んでいる。(学術会議 p.7)	放射光施設 APS (米国ANL)で超伝導ヘリカルアン ジュレータを運用(2017年から)されている。 European XFELで長大アンジュレーターが利用され、 設置誤差・軌道補正などアンジュレーター陽電子源 で必要な技術が蓄積されている。 ターゲットのチタン合金の耐久性試験が行われ、良 好な結果を得た。IDT-WG2ではハンブルグ大学が 中心となって輻射冷却型ターゲットの詳細設計を進 めている。 磁気収束としてパルスソレノイドの設計が進んでい る。	ヘリカルアンジュレータ型 陽電子源の詳細設計をす すめ、性能向上や信頼性 向上のための研究開発を 国際協力で進める。
電子駆 動陽電 子源	陽電子源の従来型ターゲット方式は所 定のビーム強度を安定的に得ることは 決して容易な達成目標ではない。(学術 会議 p.7)	磁性流体真空封止による回転ターゲットは、放射線 照射による封止部の劣化試験、模擬ターゲットの長 期ランニング試験を行い、安定回転と充分な真空封 止性能を確認した。 磁気収束回路については、BINPの実績に基づいた、 フラックスコンセントレータの電磁設計を完成、現在 熱設計を進めている。 ビーム収束部分の捕獲空洞については、安定性の 高いAPS空洞を設計し、ビーム負荷による電圧補 償法を確立した。	主要コンポーネント(回転 ターゲット、磁気収束回路、 APS空洞)のプロトタイプ を使った大電力試験、組 み合わせ試験により、長 期運転による信頼性の向 上。 放射化したターゲットの交 換システムの詳細設計を 進める。

## 指摘事項に対する取り組みのまとめ(3)

*→関連:* P.8−10,27−30, 33,37

エリア	指摘事項	これまでの進捗	今後の課題
ダンピ ングリ ング	ダンピングリングの入出射システム等に ついてはいまだ課題が多い。(有識者会 議 p.5,12)	LBNL次世代放射光施設におけるSwap-out入射や、 CLICダンピングなど、近年高速キッカーの研究開発 が進んでいる。	ATFで国際協力により ILC高速キッカーのビー ムキックの長期安定性 試験を行なう。
最終収 東	ビーム収束及び位置合わせに関する制 御・フィードバック系に関する技術の確 立や、衝突点サイトにおける常時微細 動の許容レベルに関する定量的評価が 必要。(学術会議 p.7)	KEKのATFではナノビーム技術(ビームサイズ、位置 安定化)開発を国際協力で進めた。 ビームサイズは2016年にはバンチ内粒子数1x10 <sup>9</sup> 個 のビームに対して41nm(ATFのゴール値は37nmで ILCの7.7nmに相当)まで収束。尚、ILCの設計バンチ 内粒子数(2x10 <sup>10</sup> )でのビーム誘起電磁場(Wakefield) の影響は、ATFにおける(1-2x10 <sup>9</sup> )と等価。 位置安定性は多バンチでの安定化に必要な短時間で のフィードバック(仕様の366ns以下を満たす133ns)を 実現。 花崗岩のような硬い岩盤に立地すれば常時微動は許 容値を十分下回ると算定。	国際協力により Wakefield 源となるビー ムダクトの改造やビー ムモニターの増設等の ATF高度化を行い、 ビーム収束及び位置合 わせの長期安定化試 験を実施する。
ビーム ダンプ	ハイパワーのビームを定常的かつ高い 信頼性をもって受け続けられる窓の耐 久性や窓の定期的な交換作業技術、耐 震性能等を含め、本準備期間において ダンプシステムとして技術を完成させる 必要がある。(有識者会議 p.42) 窓材の健全性モニタリング、遠隔操作に よる交換作業システムの具体的設計、 高エネルギービームと水との反応で起 こる事象の詳細については、準備期間 に十分な検討が進められなければなら ない。(学術会議 p.7)	<ul> <li>〇国内外の高出カビームダンプ・標的の視察と担当 者との協議・連携</li> <li>J-PARC(中性子、ミューオン標的)、SLACおよび JLAB(水ダンプ)、CERN(LHCビームダンプ)、</li> <li>RADIATE(高出カビーム標的・ビームダンプ)、</li> <li>RADIATE(高出カビーム標的・ビームダンプの国際研 究コラボレーション)</li> <li>OKEKの下でビームダンプ設計の再検証を継続</li> <li>ビーム窓の熱・応カ、ビーム入射によるダンプ水での キャビテーション・衝撃波の評価</li> <li>O発生するミュー粒子を含む放射線遮蔽体の設計の</li> <li>具体化</li> <li>Oダンプ水(循環水)設備の基本設計、ビームダンプ</li> <li>地下空洞の基本設計:産学連携(先端加速器推進協 議会)</li> </ul>	主要部品(ビーム窓お よびその遠隔交換シス テム等)のプロトタイプ 作成・検証とダンプシス テムの詳細技術設計作 業(安全設計の追求)を 行う。 96

### IDT-WG2



国際推進チーム(IDT)の加速器部門(WG2)は、世界の約50名の加速器研究者が参加し、ILC加速器開発研究の議論を行っている。



ワークパッケージのまとめ(1)



領域	課題	内容	技術レベルから見た貢献 可能性のある研究機関	
	超伝導高周波技術は同タイプの空洞を利用しているEuropean XFELの運用中で成熟してきている。近年は日米・日欧協力 空洞コスト削減・高性能化に取り組んでいる。3極で空洞量産実証、モジュールの組立・輸送実証を行う。			
超伝導	WP−1: 空洞量産実証	欧州、米州、アジア(含日本)にて、各40台の空洞製造・性能(歩留ま り)実証	ANL, CERN, Cornell, DESY, FNAL, IHEP, INFN LASA, IRFU/CEA, JLAB, KEK, SLAC, TRIUMF, UK	
	WP−2:クライオモ ジュール組立・移送・ 性能保持	欧州、米州、アジア(含日本)にて、各2台のCM を製造し、日本への輸 送後の性能保持の実証	ANL, CIEMAT, Cornell, DESY, FNAL, IFIC, IHEP, IJCLab, INFN LASA, IRFU/CEA, JLAB, KEK, SLAC, UK	
	WP-3:クラブ空洞	TDRで設計された3.9GHzのクラブ空洞に加えてTDR以降HL-LHCなど での技術開発の成果を含めて評価を行う。	ANL, BNL, CERN, FNAL, JLAB, LBNL, SLAC, TRIUMF, UK	
電子源	電子源はすでに目標に	t様を達成している。TDR以降の新技術の取り込みを行う。		
	WP-4:電子源	TDR以降の技術的な進捗を取り込む。	ANL, BINP, BNL, CERN, JLab, Hiroshima U., KEK, LBNL	

ワークパッケージのまとめ(2)



領域	課題	内容	技術レベルから見た貢献可 能性のある研究機関	
	アンジュレータ陽電子源はTDRで技術設計が終了している。要素部品の詳細技術設計とプロトタイプの作成を行う。			
アン ジュ レ 電子 源	WP-5 : アンジュレータ	過去のプロトタイプは十分な磁界強度を実現している。超伝導磁石 への熱侵入を制限するマスク、磁場の誤差やアライメントの影響に ついてのシミュレーション研究および設計の最適化を実施する。	ANL, DESY, FNAL, University of Hamburg, KEK, LBNL, SLAC, UK	
	WP-6: 回転ターゲット	放射冷却回転ターゲットの詳細技術設計を行う。回転ターゲットの磁 気軸受を試作・試験。ターゲットについても試作・試験。	ANL, DESY, ESS-Bilbao, FNAL, FZJ- Germany, University of Hamburg, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Juelich Kernforschungszentru, University of Mainz, SLAC, UK	
	WP-7∶磁場収束	目標の陽電子収率を達成するために、パルスソレノイドを用いた改 良型の設計、QWT (quarter wave transformer)等の代替設計も検討 中。設計を最終化し、プロトタイプを製作して試験を実施。	ANL, BNL, CERN, DESY, ESS-Bilbao, FNAL, University of Frankfurt, University of Hamburg, Helmholtz- Zentrum Geesthacht, JLab, Karlsruhe Institute of Technology, LBNL, LLNL,University of Mainz	
	電子駆動型陽電子源は、プロトタイプによる試験を実施する。			
電子駆 動陽電 子源	WP-8: 回転ターゲット	ターゲット応力・疲労評価、真空シール寿命確認、モジュール試作	CERN, FNAL, Hiroshima U., IJCLab (Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie), J-PARC, JLAB, KEK, LLNL, Waseda U.	
	WP-9∶磁場収束	磁気収束導体の電気・熱・機械的特性シミュレーション、電源・伝送 ライン設計、システム試作・試験	BINP, CERN, FNAL, Hiroshima U., IJCLab, Iwate University, Iwate Industrial Research Institute, Iwate Industry Promotion Center, KEK	
	WP-10∶捕獲空洞	部品設計と試作、ビーム負荷補償と調整方法の検討	ANL, CERN, Hiroshima U., IJCLab (Laboratoire de Physique des 2 Infinis Irène Joliot-Curie), Iwate University, Iwate Industrial Research Institute, Iwate Industry Promotion Center, JLAB, KEK	
陽電子 源共通	WP-11: ターゲット保守	ターゲットの保守はアンジュレータ型・電子駆動型陽電子源の共通 項目で概念設計は終了。残されているのは、詳細技術設計の完成。	ANL, BINP, BNL, CERN, FNAL, JLab, Hiroshima U.,KEK,	

ワークパッケージのまとめ(3)

→関連:

P.8-10,27-30,33

領域	課題	内容	技術レベルから見た貢献 可能性のある研究機関			
ダンピ ングリ ング	ダンピングリングの技術設計は終了。設計の最終化と一部要素部品のプロトタイプによる試験を実施する。					
	WP-12: システム設計	ILC250の水平エミッタンス低減のためのビーム光学系の変更を受け、 再度最適化する。ダンピングリングに永久磁石を使用する可能性につ いても検討。	ALBA, ANL, Australian Synchrotron, BNL, Cornell, ESRF, ESS-Bilbao, FNAL, KEK, LBNL, SLAC, UK			
	WP-13:集団効果	DRビーム光学系によるバンチ粒子の集団現象 を 評価。インピーダン ス・ビーム不安定性、空間電荷効果、陽電子リングの電子雲効果、電 子リングのイオン効果など。高速イオン不安定性に対応するための フィードバックシステムの設計、試作、試験。	ANL, BNL, Cornell, ESRF, ESS-Bilbao, FNAL, INFN- LNF, KEKF, LBNL, SLAC, UK			
	WP-14:入出射	ダンピングリングの入射・出射用高速キッカーのシステム設計は、DR のダイナミックアパーチャの更新を考慮。	ANL, CERN, ESS-Bilbao, FNAL, KEK, LBNL, SLAC			
ビーム 伝送シ ステム	ビーム伝送システムの技術設計は終了し衝突点付近での最終収束の目標仕様もKEKのATFでほぼ実証されている。長期安 定化試験とTDR以降の進歩を取り入れた最終設計を実施する。					
	WP-15∶最終収束	国際協力の下でATFの一部のビームライン・ビーム監視システムの改 造、安定性実証試験を行い、最終収束システム(FFS) の設計最適化 を実施。	BNL, CERN, ESS-Bilbao, FNAL, IJClab, JLAB, KEK, LAPP, LBNL, SLAC, UK			
	WP-16: 最終収東磁石	超伝導磁気コイルの巻線技術はTDR以降大幅に進歩しており、再最 適化を行う。	BNL, KEK, LAPP			
ダンプ	ビームダンプの技術設計は国際協力の下で行われた。近年はKEKが中心となってダンプ設計の確認および産学連携による システム設計を行っているところ。主要部品のプロトタイプ作成と詳細技術設計を完成させる。					
	WP-17:主ダンプ	信頼性が高く、地震に強い水ダンプシステムの詳細技術設計を実施。 ビーム窓やビーム窓交換のための遠隔操作設備関連部品の試作を 行う。	CERN, ESS-Bilbao, FNAL, JLAB, KEK, UK			
	WP-18: フォトンダンプ	技術的課題は、フォトンビームの局所的な高エネルギー蓄積。水を 使ったダンプと銅板上に薄いグラファイトをベースにしたダンプの設計 案があり、システム設計と部品試験を実施。	CERN, ESS-Bilbao, FNAL, KEK, UK 100			

3. 技術的成立性の明確化



#### <u>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】</u>

#### まとめ

加速器システムの部品は独立化・モジュール化され、その多くは実用に供されており、 LHCやSuperKEKBをはじめこれまでの大型加速器での経験も豊富にある。ILCでは特に物 納貢献(インカインド)により調達される加速器部品が多いため、一部部品の遅延の全体 計画への波及(工期の延長)を抑えることが重要で、ILC準備研究所の段階でバックアップ プランを準備する。

学術会議からの指摘

技術開発や製造工程が計画どおりに進まないことによる全体工程の変更やコストの増加の可能性の検討とその対策、すなわち、プランA(計画どおり)を補完するプランB、プランCの検討状況が見え難かった点が懸念される。(学術会議P6)

#### 当時の状況

コストは、世界三極で分担して国際研究者組織GDEにより見積られた。各種リスクによるコ スト上昇については、contingencyとして含め、各種リスクの詳細の分析は行っていなかっ た。

#### これまでの検討結果

ILCの加速器システムはこれまでの国内外の加速器の技術を踏まえて建設される。それぞれの加速器部品は独立化・モジュール化され、その多くは実用に供されており、LHCやSuperKEKBをはじめこれまでの大型加速器での経験も豊富にある。

→関連:

P.17.18

- ILCの中核となる超伝導高周波加速器については、European XFELではILCで使う10%に相当する数の加速空洞が実装され、加速器の運用が開始されており、コストの分析も進んでいる。
- 技術設計書(TDR)でのコスト見積もりの精度は25%程度であるが、ILC準備研究所でも引き続きコスト精査を続け、毎年コストに関するレビューを行い、コスト上昇に迅速に対応する。
- 計画通り進まなかった場合についても大型加速器でのこれまでの経験を活かした対応案を 整備する。ILCでは特に物納貢献(インカインド)により調達される加速器部品が多いため、 一部部品の遅延の全体計画への波及(工期の延長)を抑えることが重要であり、ILC準備研 究所の段階でバックアッププランを準備する。
- ILC準備研究所の下で、守秘が求められる詳細情報を含めて世界の大型プロジェクトの事例 研究を行なう。これらの活動を通じて、技術開発や製造工程が計画どおりに進まないときの対応案を建設の国際合意の中に組み込む。
- 有識者会議で議論されたコンティンジェンシー(予期せぬ出費のための予備費)に関しては、2019年10月のILCプロジェクト実施に関する提言[1](2.2節)においても国際合意により設定する必要性が提言されている。

準備研究所における取組み

 準備研究所における技術開発の遅れ、あるいは建設期間における製造の遅延などへのバッ <u>クアッププラン</u>を作成し、国際合意の中に組み込む。<u>European XFELの事例研究をすすめ、</u> 想定される最大リスクによるコスト上昇を予算に織り込む。

#### 4. コスト見積もりの妥当性



#### (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】

#### まとめ

有識者会議から、コスト見積の不定性と各種リスクによる追加経費の発生についての充分 な留意の必要性がしめされた。不定性については、<u>毎年コストレビューを行い、適切に管理</u> することで対応する。想定される<u>技術リスク、工期延長リスク、市場リスク</u>についてコスト への影響を評価した。

有識者会議からの指摘

- コスト見積もり不定性相当経費(25%)、さらに追加的経費の発生する可能性がある。(有 識者会議P5)
- 技術リスク、工事期間延長リスク、市場リスクなど(中略)追加的な経費が発生するリスクへの十分な留意が必要。(同)
- E-XFELのTDRでの計画に対し、完成時の本体建設費は約10%増加している。コスト アップの要因を検証し、本準備期間でのILCのコスト精査に反映させるべきである。(有 識者会議P43)

#### 当時の状況

コストは、世界三極で分担して国際研究者組織GDEにより見積られた。各種リスクによるコ スト上昇については、contingencyとして含め、各種リスクの詳細の分析は行っていなかっ た。

#### これまでの検討結果

- TDRのコスト見積もり精度は約25%で、これには技術リスク、工期延長リスク、市場リスクは含まれていないため、これらへの対処について検討した。
  - 技術リスク:2017年から運用が始まったEuropean XFELや、現在建設中のLCLS-IIでは 同様の超伝導加速技術が使用されており、ILCの技術は確立している。これにより技術リ スクは減少していると評価している。
  - 工期延長リスク:工期延長リスクには物納貢献による物品製造の遅れ、土木工事の工期 延長がある。有識者会議が指摘するようにEuropean XFELではこれらを原因とするコス ト上昇は10%程度であり、ILCでも現状では同程度のリスクがあると評価している。
  - 市場リスク:ヘリウムや超伝導空洞の材料であるニオブ材などには市場リスクがある。
     例えば、価格変動が懸念されるニオブ等の材料価格の占める割合は3%程度と評価している。

準備研究所における取組み

- 準備研究所で毎年コストレビューを行い、<u>コスト上昇に迅速に対応</u>する。
- 準備研究所における技術開発の遅れ、あるいは建設期間における製造の遅延などへのバッ クアッププランを作成し、国際合意の中に組み込む。European XFELの事例理解をすすめ、 想定される最大リスクによるコスト上昇を予算に織り込む。
- 市場リスクについては、想定されるリスクを関連研究機関の協力を得て精査し、複数の調 達先の確保や、直接調達などのバックアッププランを作成してリスクの低減に努めるとと もに、想定される最大リスクによるコスト上昇を予算に織り込む。

*→関連: P.17.18* 

# コスト評価について



- TDRはバリー・バリッシュ氏をディレクターとする研究者組織GDEで、49か国、 392機関、2400名以上が参加してまとめられた。
  - 世界統一の設計を行い、それぞれ国際協力の下で物品を持ち寄ることを想定 しILCUと呼ばれる仮想的な単位により算出。
- 超伝導加速器についてはXFEL (ILCの1/10モデル)の調達実績、それ以外についても大型加速器(LHC、KEKBなど)での実績を踏まえ、国際協力のもとでまとめられている。
- 250GeV ILC (2017) 見積もりでは、物価変動と為替および超伝導加速器部分の 員数減少(による単価増加)が加味された。

# ILCでの超伝導加速器製造・組立てのモデル ILC SRF Global Integration Model



## 空洞製造プロセス





### 国際協力による見積もり作業



TDRには、49か国、392機関、2400名以上が参加した。



世界各国の研究所と連携して、各国の企業訪問、見積もり打ち合わせ 2009~



### URL site: prepared for

### visiting SCRF Cavity Manufacturers

共通の説明・技術仕様を示し、 コスト見積もりを依頼

ILC Global Design Effort Project Manager visit to SCRF ca...





### ILC Global Design Effort Project Manager visit to SCRF cavity manufacturers

#### February - March 2009

In early 2009 the ILC Global Design Effort Project Managers (Akira Yamamoto, Marc Ross, and Nick Walker) visited and were graciously hosted by many of the world's top superconducting RF cavity manufacturers. The objective of the visit was to:

- 1. Learn industrial status and possible future at cavity manufacturers.
- 2. Communicate the ILC GDE Technical Design Phase R&D Plan.
- Request further industrial R&D effort, particularly to improve "field gradient" and "cost effective production" in order to prepare for the industrialization (mass production).
- 4. Establish close communication and a confident relationship between ILC GDE and vendors.

This web page is intended to capture the material presented to vendors and to include key references.

<u>Global R&D Effort of SCRF Cavity Development for the International Linear Collider</u> (pdf, 5Mb) Akira Yamamoto, Marc Ross, and Nick Walker - Project Managers for the ILC Global Design Effort, material presented to each of the SCRF cavity manufacturers.

Superconducting RF Cavity Development for the International Linear Collider (pdf, 4Mb) Akira Yamamoto for the ILC Global Design Effort, paper presented at Applied Superconductivity Conference 2008 (ASC 2008).

<u>Global R&D effort for the ILC linac technology</u> (pdf, 4Mb) Akira Yamamoto for the ILC Global Design Effort, paper presented to EPAC 2008.



(Last updated: 25 February 2009)

### コスト見積もりのプロセス







## ILC-SRF 空洞・CMの工業化検討および コスト見積もり、コストレビューの経過

年	アクション		
2009~2013	企業訪問(19企業、ほぼ2巡)		
2010~	企業・工業界との合同ワークショップ・意見交換		
~2011	企業からのコスト見積もり受領(欧州XFEL-SRF 入札と同規格・ 同等基準による)		
2011~2012	対応実績に基づき選定された企業との有償契約による、より詳 細な量産見積もりの受領		
2012 (Nov)	ILC-GDE 内部でのコストレビュー		
2913 (Feb)	外部委員によるコストレビュー		

# **二才**ブ(Nb)



		最大の供給元であるCBMM(フラジル鉱山企業)
ltem	TDR Cost Basis	のニオブ材コストは2009年からほぼ一定となって
Superconducting material Cavity resonator Power coupler Tuner Helium vessel Magnet package Cryostat materials Cryomodule assembly	EXFEL procurement <sup>†</sup> industrial study EXFEL procurement <sup>†</sup> EXFEL procurement <sup>†</sup> EXFEL procurement <sup>†</sup> vendor quote EXFEL procurement <sup>†</sup> industrial study	いる。 現在R&Dが進められているインゴットからの直接 スライスが実用化されれば、ニオブ入手経路の 多様化が可能となり、コストはさらに安定すると 考えられる。 ILC250の9,000空洞に必要なニオブインゴットは 約210トン。 CBMMが年間供給しているFeNb(鉄鋼添加剤 用)が年間9万トン、Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 年間1万トン。(このうち、

<sup>†</sup> discount based on a 95 % learning curve

(2000年 = 1として指数表示)



参考:ニオブの材料の占める割合 はILC建設コストの3%程度

Nbメタルが年間210トン)

<価格推移のポイント> ・安定価格、安定供給 ・2006年以降、需要急増 を受けて、供給がひっ迫 ・CBMMが生産能力を拡張 100千→150千t/yへ (2020年末完了) ・需給のひっ迫は今後 発生しづらくなる見込み

### ILC建設へのEuropean XFEL建設実績の反映

*→関連: P.17,18* 

European XFEL建設は、2008年改訂の当初予算(TDR-adjusted)に、2012年および2015年に認められた追加予算を加え た範囲内で<mark>2017年に完成</mark>している。

ILC 加速器建設費の見積は、2008年に調整されたEuropean XFEL建設当初予算(TDR-adjusted)および2011年までの入 <mark>札実績</mark>が反映された。



Note: ILC-PIP: ILC Project Implementation Plan (2015), TDR: Technical Design Report, RDR: Reference Design Report, EDR, Engineering Design Report (詳細技術設計書)

ILCと同様の超伝導技術を基盤とし、ILC計画の1/10規模となる欧州自由電子レーザ施設(European XFEL)が建設、2017年に完成。4年間を超える安定なユーザー運転実績、超伝導加速器システムとして、ILCプロトタイプ加速器・技術実証への重要な実績を示す役割を果たしている。
 主な追加は「土木・建築費の好況による一時的価格高騰」+「建設遅延(1年以内)による労務費増加」。



### European XFEL 建設予算の推移(2005年ユーロを基準)



European XFEL建設は、2008年改訂の当初予算(TDR-adjusted)に、2012年、2015年に認められた 追加予算を加えた範囲内で2017年に完成している。

	TDR for Pre-XFEL start-up	TDR adjusted <sup>1)</sup> for Full-Performance	Mid-Update <sup>2)</sup> during construction	Update Final	Rati
TDR → 完成	2006~2007	Feb. 2008 (調整)	建設(中間)	完成(前)	
合意/承認 年	July 2007 (Collab. Agree.)	Nov. 2009 (Council)	2012 (Council)	2015 (Council)	
準備	39M€	39M€	→ 39M€		
建設	849M€	986M€	→ 986M€		
コミッショニング	50M€	50M€	→ 50M€		
リスク予算 (成功確度98%の為)		(+78M€: 提案のみ)	+78M€ (予算化)		
遅延等による追加				+66M€	
建設予算·合計	938M€ →	1,082M€ →	1,160M€ <del>→</del>	1,226M€ 1,226M€	+13 % <sup>1)</sup> +6% <sup>2)</sup>
ノート:		ILCコスト見積はこの中間	間(入札実績)を参照。		

1) European XFEL 建設開始・当初予算総額中心値(成功確度・50%)に対する上昇率: 13 %

2) European XFEL 建設中, Mid-Update (建設開始時・成功確度予想・98%値に改訂)に対する建設費上昇率: 6%

主な追加要因:「土木・建築好況での一時的価格高騰」+「建設遅延(<1年)による労務費増加」

### ILC-SRF空洞性能・未到達リスクへの対応の検討(例)



