

国際リニアコライダー（ILC）計画に関する技術的実現可能性
及び加速器製作における技術的課題等に関する調査分析
調査報告書

平成 28 年 2 月

株式会社 野村総合研究所

はじめに

文部科学省では高エネルギー物理学分野の研究者から提案のなされている「国際リニアコライダー (ILC) 計画」について、平成25年5月に日本学術会議に実現可能性に関する審査を依頼した。平成25年9月末に文部科学省へ提出のあった回答書の中で、「重要事項に関して不確定要素やリスク要因があり、本格実施を現時点において認めることは時期尚早」とされた。

文部科学省では、日本学術会議の回答を踏まえ、ILC 計画の実施の可否判断に資する調査検討を行っており、平成26年度においては、「技術的・経済的波及効果」「世界各国における素粒子・原子核物理学分野の将来構想等」について、調査・分析を実施したが、平成27年度においては、「技術的実現可能性」、「加速器製作における技術的課題」、「加速器製造コスト削減に向けた取組」について、調査・分析を実施する。

「技術的実現可能性」については、ILC の加速器製作において用いられる技術の要素技術開発の達成度と問題点を調査・分析し、ILC 計画の目標性能を実現する上で各技術開発の成功の可否が目標性能にどう影響するかを考慮し、現状の開発状況を基にリスク評価を行なう。また、「加速器製作における技術的課題」では、これまでに類を見ない大規模部品製造を伴うため、技術要素開発段階の試作品の製作プロセスを大量生産可能な製造プロセスへ転換する上での技術的課題に関し調査を行なう。さらに、「加速器製作におけるコスト削減に向けた取組」に関しては、ILC の技術設計報告書 (TDR: Technical Design Report) で示されたコストが高額であるため、実施の可否判断に向けて、TDR で採用されていない新規技術の導入により高効率・低コストを達成する可能性に関し調査を行なう。

なお、本調査・分析の実施に際しては、加速器科学分野と同分野の技術を他分野において活用できることについて知見や経験のある有識者による「ILC 技術的実現可能性等検討委員会」を設置し、調査・分析結果や報告書の内容についてご検討いただいた。

熊谷委員長を始め委員の皆様には、活発なご議論、貴重なご意見をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

また、海外 (欧米) ヒアリング調査には、加速器の専門家の方々にご同行いただいた。

専門家の皆様には、ヒアリング調査へのご支援をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

「ILC 技術的実現可能性等検討委員会」委員名簿

(五十音順)

	氏名 (敬称略)	所属・役職名
委員	相澤 修一	日本高周波株式会社 執行役員 第一事業部長
委員	石井 伸也	三菱重工業株式会社 ICTソリューション本部 製品ソリューションセンター 主席プロジェクト総括
委員	上垣外 修一	理化学研究所加速器基盤研究部 部長
委員	川越 清以	九州大学先端素粒子物理研究センター センター長
委員長	熊谷 教孝	高輝度光科学研究センター 研究顧問
委員	熊田 幸生	住友重機械工業株式会社 執行役員
委員	高津 英幸	日本原子力研究開発機構 核融合開発部門 特任参与
委員	田中 均	理化学研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門 部門長
委員	野田 耕司	放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター・物理工学部 部長
委員	長谷川 和男	日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 加速器ディビジョン長

ヒアリング調査同行専門家名簿

(五十音順)

	氏名 (敬称略)	所属・役職
専門家	古屋 貴章	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 特別教授
専門家	道園 真一郎	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 教授

インタビュー調査ご協力への謝辞

本調査・分析の一環として現地訪問インタビュー調査を実施しました際には、各国の研究機関及び民間企業の方々から、多くの貴重なご意見やご助言をいただきました。訪問先は、以下に掲げさせていただきます。

それらを踏まえて、この調査報告書を纏めることができましたこと、ご協力いただいた全ての皆様に深く感謝申し上げます。

【研究機関】

国名	機関名
ドイツ	ドイツ電子シンクロtron研究所 DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
スイス	欧州合同原子核研究機関 CERN (European Organization for Nuclear Research)
イタリア	国立原子核物理研究所-加速器・応用超伝導研究所 INFN-LASA (The Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata)
	国立原子核物理研究所-フラスカティ国立研究所 INFN-LNF (Laboratori Nazionali di Frascati)
フランス	CEA宇宙基礎科学研究所 CEA-IRFU (Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe)
	CNRS線形加速器研究所 CNRS-LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire)
英国	STFCデアズベリー研究所 STFC (Science and Technology Facilities Council) Daresbury Laboratory
米国	SLAC国立加速器研究所 SLAC National Accelerator Laboratory (SLAC)
	トーマス・ジェファソン国立加速器施設 Jefferson Lab (Thomas Jefferson National Accelerator Facility) (JLab)
	フェルミ国立加速器研究所 FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory <Fermilab>)
日本	国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター RIKEN SPring-8 Center
	大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

【企業】

国名	企業名
ドイツ	Babcock Noell GmbH
	RI Research Instruments GmbH
フランス	Alsyom
	Air Liquide
	Aperam Thales Electron Devices
イタリア	Ettore Zanon S.p.A.
米国	Advanced Energy Systems (AES)
	Communications & Power Industries (CPI), LLC
	C. F. Roark Welding & Engineering Co., Inc. (ROARK)
日本	三菱重工業株式会社
	株式会社地盤システム研究所
	日本高周波株式会社
	東芝電子管デバイス株式会社 株式会社大林組、清水建設株式会社

調査の目的と方法

1. 調査の目的

1) 技術的実現可能性についての調査

「技術的実現可能性」については、ILC の加速器製作において用いられる技術の要素技術開発の達成度と問題点を調査・分析し、ILC 計画の目標性能を実現する上で各技術開発の成功の可否が目標性能にどう影響するかを考慮し、現状の開発状況を基にリスク評価を実施することを目的とする。

2) 加速器製作における技術的課題の分析

「加速器製作における技術的課題」では、これまでに類を見ない大規模部品製造を伴うため、技術要素開発段階の試作品の製作プロセスを大量生産可能な製造プロセスへ転換する上での技術的課題に関し調査を実施することを目的とする。

3) 加速器製作におけるコスト削減に向けた取組の分析

「加速器製作におけるコスト削減に向けた取組」に関しては、ILC の技術設計報告書（TDR）で示されたコストが高額であるため、実施の可否判断に向けて、TDR で採用されていない新規技術の導入により高効率・低コストを達成する可能性に関し調査を実施することを目的とする。

2. 調査の方法

1) 技術的実現可能性についての調査

ILC の目指すべき性能が、ILC を推進する研究者の間で作成された現時点の設計書である技術設計報告書（TDR）に記載された仕様によって達成できる可能性、及び、その実現に向けた技術的な検討状況等について、技術設計報告書（TDR）を含む文献等により以下の調査項目を整理した上で、関係する国内外の研究機関及び企業に出向き、現地で以下の調査項目についてのヒアリング調査を行い、その内容を取りまとめる。

ヒアリング調査にあたっては、加速器研究に知見のある外部の者（1名以上）に御同行いただく。また、調査対象機関の選定に当たっては、日本国内だけでなく、米国、ドイツ、フランス、イタリアを含む加速器の製造・利用が盛んな国（5か国以上）の研究機関（各国2機関以上）及び企業（各国2社以上）とする。

【調査項目】

- (1) コンポーネント
- (2) システム設計
- (3) マネジメント
- (4) インフラ

2) 加速器製作における技術的課題の分析

ILC 計画では、大規模部品製造に加えて、精密な組み上げ工程が限られた時間内で必要になることから、国内外の企業における技術レベルの状況と潜在製造能力を把握した上で、量産品の製作スケジュールが個々の企業の製造能力で達成可能か具体的な事例について実地調査を実施する。実地調査にあたっては、加速器研究に知見のある外部の者（1名以上）に御同行いただく。

このため、上記1)における調査を踏まえ、ILC 製作（構成部品の製造も含む）を実際に行うとした場合に課題と考えられている部分について、実施者の類系（部品製造企業、コンポーネント等の製作に当たる研究所等）毎に、以下の（1）～（3）について、分析を行い、取りまとめる。なお、調査対象機関の選定にあたっては、日本国内だけでなく、米国、ドイツ、フランス、イタリアを含む加速器の製造・利用が盛んな国（5か国以上）の研究機関（各国2機関以上）及び企業（各国2社以上）とする。

【調査項目】

- （1）検討場所 <インフラのみ>
- （2）課題解決の方法
- （3）課題解決に要する期間・コスト

3) 加速器製作におけるコスト削減に向けた取組の分析

ILC に用いる部品が、更にコンパクト・高性能のもので代替することが可能か及びその技術開発の状況について、取り組みが行われている国内外の研究機関及び企業に出向き、その技術レベルの状況、実用化に向けた課題、実用化までに見積もられる期間と潜在製造能力を把握した上で、調査時点で実用化に近い高効率部品の有無など具体的な事例についてヒアリング調査を行い、その内容を取りまとめる。

ヒアリング調査にあたっては、加速器研究に知見のある外部の者（1名以上）に御同行いただく。また、調査対象機関の選定にあたっては、日本国内だけでなく、米国、ドイツ、フランス、イタリアを含む加速器の製造・利用が盛んな国（5か国以上）の研究機関（各国2機関以上）及び企業（各国2社以上）とする。

なお、実際のヒアリング調査にあたっては、調査の容易性や効率性の観点から、ILC の主要技術・コンポーネンツ（超伝導加速器技術、高周波技術、ビーム技術、クライオジェニクス技術、インフラ土木技術）を想定し、個別の要素技術・コンポーネンツ別に、「技術的実現可能性」、「加速器製作における技術的課題」、「加速器製作におけるコスト削減に向けた取組」の視点から調査を行なった。

したがって、調査報告書の項目立てと取りまとめは、ILC の技術・コンポーネンツを単位として行なっていることに留意されたい。

目次

I. 全体の要約と結論	1
1. ILC の要素技術の「技術的実現可能性」	1
2. ILC の「加速器製作における技術的課題」（量産化の課題）	6
3. ILC の「加速器製作におけるコスト削減に向けた取組」	8
II. ILC の主要技術・コンポーネント別の技術的実現可能性の検討	15
1. 超伝導加速器技術	15
1) 加速空洞の素材（ニオブ）	15
(1) ILC の TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	15
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	15
(3) インゴットを用いた製造方法の評価及び技術的課題	18
2) 超伝導加速空洞	19
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	19
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	19
(3) 超伝導加速空洞の評価と技術的課題	26
3) クライオモジュール	38
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	38
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	38
(3) クライオモジュールの評価と技術的課題	46
2. 高周波技術	51
1) RF 電源システム（モジュレータ）	51
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	51
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	52
(3) モジュレータの評価と技術的課題	56
2) クライストロン	58
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	58
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	59
(3) クライストロンの評価と技術的課題	62
3) 入力カプラー	64
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	64
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	65
(3) カプラーの評価と技術的課題	68
4) 機械式チューナー	73
(1) TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要	73
(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態	73
5) ローカル RF パワー供給システム（LPDS）	74

(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	74
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	75
(3) ローカル RF パワー供給システム (LPDS) の評価と技術的課題.....	76
3. ビーム技術.....	79
1) 偏極電子源.....	79
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	79
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	80
(3) 偏極電子源の評価と技術的課題.....	85
2) 陽電子源.....	90
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	90
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	91
(3) 陽電子源の評価と技術的課題.....	94
3) 高速ビームフィードバックシステム.....	102
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	102
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	102
(3) 高速ビームフィードバックシステムの評価と技術的課題.....	108
4) ダンピングリング (DR).....	111
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	111
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	112
(3) ダンピングリング (DR) の評価と技術的課題.....	113
5) 最終収束部 (BDS).....	119
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	119
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	119
(3) 最終収束部 (BDS) の評価と技術的課題.....	120
6) ビームダンプ.....	122
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	122
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	123
(3) ILC のビームダンプの評価と技術的課題.....	123
7) クラブ空洞システム.....	126
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	126
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	127
(3) ILC のクラブ空洞システムの評価と技術的課題.....	128
4. クライオジェニクス (低温) 技術、磁石技術.....	130
1) クライオジェニクスシステム機器の地上配置.....	130
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	130
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	131
(3) ILC のクライオジェニクスシステムの評価と技術的課題.....	132
2) 超伝導磁石.....	135

(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	135
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	135
(3) 超伝導磁石の評価と技術的課題.....	135
5. インフラ土木技術	136
1) 実験空洞へのアクセス方法変更 (立坑アクセスへ)	136
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	136
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	136
2) 主線形加速器 (ML) トンネルの延長.....	138
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	138
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	138
(3) 主線形加速器 (ML) トンネル (ML) 延長の評価と技術的課題.....	139
3) 主線形加速器 (ML) トンネル内の遮蔽壁の厚さ変更.....	140
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	140
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	140
(3) ML トンネル内の遮蔽壁の厚さ変更の評価と技術的課題.....	141
4) BDS トンネルの形状・断面の見直し	143
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	143
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	143
(3) BDS トンネルの形状・断面の見直しの評価と技術的課題	143
5) ILC トンネルの建設・工法の技術的課題	144
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	144
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	144
(3) ILC トンネルの建設・工法の評価と技術的課題.....	146
6) ILC トンネルにおける湧水及び温湿度の管理の想定と技術的課題	150
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	150
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	150
(3) ILC トンネルの湧水及び温湿度管理技術の評価と課題	151
7) ILC トンネルにおける事故対策想定と技術的課題	154
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	154
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	155
(3) ILC トンネルの事故対策の課題.....	157
8) その他土木工事に関連する検討事項と技術的課題	159
(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要.....	159
(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態.....	159
III. 国内外研究機関・企業へのアンケート・ヒアリング調査結果	160
1. アンケート・ヒアリング対象機関	160
2. アンケート・ヒアリング調査項目	162

3. アンケート・ヒアリング調査結果	163
1) 欧州の研究機関・企業への調査結果	163
2) 米国の研究機関・企業への調査結果	171
3) 日本の研究機関・企業への調査結果	178
IV. 他の国際共同大型プロジェクトのリスク要因調査	187
1. 大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) / 欧州合同原子核研究機構 (CERN)	188
1) プロジェクトの概要	188
2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例	189
2. 国際熱核融合実験炉 (ITER) / 国際核融合エネルギー機構 (IO)	192
1) プロジェクトの概要	192
2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例	193
3. 国際宇宙ステーション (ISS) / 国際宇宙基地協力協定	196
1) プロジェクトの概要	196
2) コストの超過、スケジュールの遅延等の事例	197
4. 考察	202

省略表記用語集

1. 全体の要約と結論

1. ILC の要素技術の「技術的実現可能性」

ILC（国際リニアコライダー）を構成する主要な要素技術（製造品含む）の技術的実現可能性について、欧米日の研究機関及び関連企業へヒアリングした結果をまとめると、以下のとおりである（添付図表2のまとめも合わせて参照のこと）。

1) 超伝導加速技術、クライオジェニクス技術

「超伝導加速空洞」については、ILC 向けのプロトタイプとして位置づけられる E-XFEL（欧州 X 線自由電子レーザー）用 TESLA 型空洞が開発・製造されており、その性能（平均加速勾配）は、ILC の要求性能をほぼ達成する水準に至っている。今後は、低コストで効率的かつ確実に要求性能を満たすために、空洞製造工程の改善（最終工程での電解研磨実施等）、大量処理が可能な電子ビーム溶接方法や装置の開発・改善（4 本同時電子ビーム溶接等）、低コストで効率的な空洞表面処理技術の開発・改善（アルカリ電解研磨、縦型電解研磨装置等）、クリーンルームの設備・作業の改善などによる、より一層の性能向上が課題となっている。

「クライオモジュール」については、ILC 向けのプロトタイプとして加速空洞と同様に E-XFEL 用クライオモジュールが開発・製作されているが、その性能（平均加速勾配）は ILC の要求性能にやや未達の状況にある（目標の 90% 弱の水準）。したがって今後は、要求性能達成に向けて、加速空洞を連結しモジュールにした後の性能低下の原因解明と対処、複数のクライオモジュールの連携による性能実証などが課題である。

「超伝導磁石」については、CERN（欧州合同原子核研究機関：スイス）の LHC（大型ハドロン衝突型加速器）の経験や実績を通して、ILC 向けの超伝導磁石技術は基本的に確立済である。なお、磁石の支持機構および冷媒からの微弱振動が磁場精度に与える影響の検証が技術的な課題として挙げられている。

「クライオジェニック（冷凍）プラント」については、CERN の LHC のクライオジェニックプラントが、規模・技術の面で ILC 向けのプロトタイプとして位置づけられており、プラントを構成する要素技術については既に確立済みとされている。今後は、ILC の立地特性に対応し、長距離冷蔵輸送ラインの冷却効率の維持向上、ヘリウムロスの低減などの若干の課題に対応していく必要があるとされる。

2) 高周波技術

「モジュレータ（マルクス型電源）」については、ILC 向けのプロトタイプとして現在 3 つのタイプ（①SLAC-P2 電源、②DTI 電源、③KEK チョッパ型電源）が開発中であるものの、タイプ①は研究停止、②は故障のため稼働していない。調査時点では③のチョッパ型電源のみが KEK（高エネルギー加速器研究機構：日）にて実証実験中である。したがって今後は、開発体制や技術の集約化による一つのタイプに絞った ILC 用プロトタイプの開発・実証を、高速・大電流・高耐圧・低損失半導体スイッチの開発（半導体素子の開発も含む）や、パルスが発生させるハードウェアとそれを制御するソフトウェアの開発などとともに進めることが課題として指摘されている。

「クライストロン」については、ILC 向けのプロトタイプは、日米欧の企業によって E-XFEL 用に生産されている 1.3GHz 10MW マルチビームクライストロン（MBK）が該当する。現状では E-XFEL 用の MBK は、ILC の仕様と若干異なっており、ILC 向けには多少の機械設計の変更は必要となるが、大幅な設計変更は必要ないとされる。したがって、MBK の現製品（技術）は、ILC の要求性能を満たすと判断されている。

「カプラー」については、ILC 向けのプロトタイプは、日米欧の企業によって E-XFEL 向けに生産されているカプラーが該当する。E-XFEL 用カプラーは、既に ILC の性能基準に達しており、技術的な課題は特に無いとされている。

「ローカル RF パワー供給システム（LPDS）」については、ILC 向けの導波管、導波管コンポーネントの技術は基本的に確立済みである。ただし、LPDS 全体として、クライオモジュールへの取付け方法の検討、クライオモジュール一体型の LPDS の実現と試験が、今後の課題として指摘されている。また、導波管や導波管コンポーネントの一部における改善・改良の必要性も指摘されている。

3) ビーム技術

「偏極電子源」は、フォトカソード、電子銃、レーザーシステムの 3 つの要素技術から構成される。ILC 向けのフォトカソードについては、超格子カソード（ガリウム砒素とガリウム砒素リンの組合せ）が想定されており、これまでの実証により ILC の目標値は達成しているが、今後は高偏極度でより量子効率の高いカソード開発が有用とされている。また、ILC 向けの電子銃については、基本的には実証済みで技術的には完成しているが、電子ビーム性能向上（ビームの広がりや輸送時損失を抑える）ためにより高電圧の電子銃の開発が有用とされている。レーザーシステムについては、ILC ではマルチバンチ時間構造のレーザーシステムが必要とされており、DESY（ドイツ電子シンクロトロン研究所：独）で開発されているレーザーシステム（OPCPA 方式）が ILC に有用と認識されている。た

だし、ILC 電子源用に繰返し、パルス幅を合わせた実証機の開発などが課題として挙げられている。

「陽電子源」については、ILC ではヘリカルアンジュレータと水冷式の標的から構成される陽電子源が想定されている。アンジュレータについては、ILC 向け超伝導ヘリカルアンジュレータ・モジュールがプロトタイプとして STFC (科学技術施設庁：英) の研究所で開発されたが、一部 ILC の目標値を達成しない条件 (磁場精度) があり、またビーム試験は行なわれなかった。したがって、今後の課題として、ヘリカルアンジュレータを実装するためにはビーム試験の実施が重要であることが指摘されている。

一方、標的については、水冷方式の開発がこれまで不調であったため、現在水冷方式によらない2つの標的冷却方式タイプ (①Sliding contact cooling 方式、②Radiation cooling 方式) が開発中である。しかし、タイプ①は接触させる部品を開発中、タイプ②はまだ設計最適化の段階にあるなど開発の余地は大きい。したがって、今後の課題としては、標的の冷却技術の目途をつけプロトタイプを開発し、性能保証に必要なビーム試験を行なうこと、また、部品 (消耗品) の遠隔交換技術を開発することなどが指摘されている。

「陽電子源 (バックアップ)」の電子駆動方式は、上記のヘリカルアンジュレータ方式のバックアップ方式として、KEK が開発しているものである。同方式の要素技術は、既に実証されている標準的な技術であるとされているが、標的についてはいくつかの技術的課題があり、標的のプロトタイプの開発・実証、特に回転体軸シールのモデル開発・実証 (回転体のシールの耐放射線性の試験、シール材劣化の検証等) の必要性が指摘されている。また、電子駆動方式は「偏極陽電子が得られない」という特性を持つため、ILC 素粒子実験スキームとの整合・調整が必要とされている。

「ダンピングリング (DR)」については、ILC の同種のリングとして多数の第3世代光源 (Diamond、ASLS、ESRF、SLS、SSRF 等) があり、基本的な要素技術については実証済みとされている。また、既存の電子陽電子コライダー及びシンクロトロン光源のうち数基は、ILC・DR に必要なビーム性能と同等の性能 (超低エミッタンス、バンチ数、バンチ間隔等) を達成している。ただし、今後の課題としては、ILC 入射・出射システムの重要要素 (パルス立上り・下り時間、パルスの繰返率、キックの振幅・振幅安定性等) の同時達成に向けたさらなる研究開発、高速キッカーの長期運転時の安定性と信頼性の評価、電子雲の不安定性を軽減する真空システムの開発などの必要性が指摘されている。

「ビーム制御」のうち、「DR 周回ビームの高速フィードバックシステム」については、ILC のプロトタイプと呼べるものは無く、DR のパラメータでのフィードバックシステムの性能検証は未実施である。しかし、一部技術に関しては、INFN-LNF (国立原子核物理研究所—フラスカティ国立研究所：伊) の DAΦNE、KEK の SuperKEKB 等のシステムが利用可能とされている。したがって、今後の課題としては、ILC・DR のパラメータでの高速フィードバックシステム (試作システム) の開発が指摘されている。

一方、「衝突点の高速ビームフィードバックシステム」については、JAI（ジョンアダムス研究所：英）によって開発された試作システム（マルチバンチビーム監視制御システム）が KEK・ATF2 のビームラインに配備され、ILC の要求性能について実証済みである。今後の課題としては、ILC に多く使われるビーム診断機器の横断的な計測技術の研究などが挙げられている。

「ビームダンプ」については、ILC 仕様のビームダンプのプロトタイプ試作は未実施であり、ILC の要求性能は未実証である（米国 SLAC 国立加速器研究所の 2.2MW ダンプを基準にした設計とシミュレーションがあるのみ）。したがって、今後の重要な課題として、事故によりダンプ窓の 1 点にバンチが集中し窓が破壊された場合の事故対策の検証、高強度放射線環境下の冷却水による窓材の腐食等耐久性の検証、ダンプビームにより発生する放射性物質（トリチウム等）の安全管理技術の開発などが挙げられている。

「クラブ空洞システム」については、ILC で想定される超伝導 9 セルクラブ空洞のプロトタイプは開発されておらず（1 セル空洞での実験のみ）、ILC の要求性能は未実証である。また、クラブ空洞システムに不可欠な HOM カプラーに関しても要求性能は未達成である。したがって、今後は、超伝導 9 セル空洞のプロトタイプ（カプラー装着）の製造・実証、クライオモジュール/クライオスタットの設計とプロトタイプの製造・実証、HOM カプラーの再設計と製造・実証などが課題として指摘されている。

4) インフラ土木技術

ILC のトンネル・大空洞の工法として、NATM 工法（ナトム：New Austrian Tunneling Method）が想定されている。基本的に NATM 工法は、地質対応等に柔軟に対応できるという点で有効であると評価されている。一方で、ILC のトンネル・大空洞建設の課題として以下の点が指摘されている。

「建設マネジメント」については、CM（コンストラクション・マネジメント）の専門家等のインハウス・エンジニアの確保と組織化、発注者・受注者のリスク分担等の建設ルールづくり、突発事態発生等の状況に応じて工事を柔軟に変更していく情報化施工の導入、環境への影響が多岐に及ぶことに起因する環境アセスメントの長期化の回避、土木工事と加速器設置工事の期間輻輳問題への対応などが課題として指摘されている。また、ILC の工事準備期間（4 年）が短過ぎるとの指摘も一部で出ている。

「湧水管理」については、湧水は、覆工や底盤の背面に設置されたドレーンや排水溝を通じて直接坑外に排水されるため、トンネル内部への湧水はほとんどないと推測されている。また、トンネル内への湧水は掘削時に多くなるが、坑内水を坑外へ排水する有効的な対応策（貯水ピットとポンプ設置等）を講ずることによって対処できる。これらを総合的に判断するとトンネルの地下水（湧水）は完全に管理できるといえるが、地下水量を事前に予測することは困難な側面があると指摘されている。

特に、北上（想定）ではトンネル掘削中に、多量の突発湧水が発生する可能性が高いと推測されており、湧水の施工中（施工後も含めて）の処理が大きな課題であると指摘されている。具体的には、遭遇する地下水を減少させる水抜きボーリングや、有効かつ経済的な排水ポンプアップ施設等を計画することが重要であるとされる。

「管理排水」については、ILC トンネルでは防水対策が十分であっても、二次覆工コンクリートのひび割れなどから発生する微量の湧水を避けることはできず、これがトンネル内の管理水となる。ただし、現時点で、ILC トンネル内の管理水の発生量を正確に算定することは難しいとされる。仮に、トンネル施工後に流れるほどの湧水が発生する場合には、側溝、導水パイプ、貯水槽を設置し、集水して処理（モニター管理）する。一方、湧水が滴る程度であれば、トンネル内に屋根や滴水皿を設置する、あるいは自然蒸発させるなどによって対処できるとされている。

一方、ILC 運転時の放射線の影響については、トンネルの二次覆工コンクリート厚が 30cm あれば背面の湧水が放射化されることはないと考えられている。しかし、防水シート外側の水を清水として扱うためには、コンクリートの厚みが放射化を防ぐのに十分かの再検討が必要であるとの指摘もある。

「温度・湿度管理」については、ILC ではトンネル内の目標設定室温は 25℃程度、湿度は 40～60%程度と想定されている（KEK の見解）。トンネル内の温度・湿度の管理は、通常の空調等の管理設備によって制御可能とされるが、温度推計（トンネル内の発生熱量をもとにした推計）を行なうことが課題として指摘されている。

「事故対策」については、全体として、地下構造物は煙の処理の考え方など建築構造物と全く異なっており、それを踏まえた防災計画策定の必要性が指摘されている。より具体的には、トンネルが電源喪失となった場合の水没を回避する方策、火災発生時の煙の制御・排出や新鮮な空気供給の方策、ヘリウムリークへの対応策などの検討が課題として挙げられている。

一方、「耐震設計」については、「良好な地山中に建設される地下施設は、原則として地震の影響を考慮する必要はない（土木学会のトンネル標準示方書）」とされているが、ILC は長大トンネル及び大規模地下空洞を利用する国際的な最先端実験施設となることから、その耐震・安全性の確保には最大限の配慮が求められると指摘されている。具体的には、地点を概略特定した上で、入力地震動の適切な設定、解析評価手法の選定、評価基準の適切な設定等が課題として挙げられている。また、アクセストンネルの坑口部、断層破碎帯や地質急変部等における影響評価も課題として指摘されている。

2. ILC の「加速器製作における技術的課題」（量産化の課題）

ILC の加速器に関連する主要機器・コンポーネントの「量産化」に向けた可能性と技術的課題について欧米日の研究機関及び関連企業へのヒアリングした結果をまとめると、以下のとおりである（添付図表 2 及び図表 3 のまとめも合わせて参照のこと）。

量産化の対象とした主な機器・コンポーネントは、超伝導加速空洞、クライオモジュール、クライストロン、カップラーである。これらの ILC における必要量は概ね図表 1 のように想定した（KEK からの情報をもとに想定）。

図表 1 ILC 量産コンポーネントの必要生産量（製造期間 6 年）

（単位：台）

	ILC 全体必要生産量		年間必要生産量（製造期間：6年）		
	全体合計	日米欧1極当り	全体合計	日米欧1極当り	1極1社当り(※)
加速空洞	18,000	6,000	3,000	1,000	500
クライオモジュール	1,855	617	309	103	52
カップラー	16,000	5,333	2,667	889	444
クライストロン	440	147	73	24	12

（※）1極当り2社で製造すると仮定

（出典）KEK からの ILC 全体必要生産量をもとに試算

1) 超伝導加速技術

①超伝導加速空洞

「超伝導加速空洞」の主な製造企業における量産化の可能性については、次のとおりである。欧州の Zanon 社は、空洞製造能力を 2 倍（設備・人員は 1.6 倍程度）にして年間 400 台の製造は可能であると回答している。また、RI 社は、空洞製造能力を労働投入増強（3 シフト、週 7 日労働）、設備増強 20%アップで年間 500 台の製造は可能であると回答している。

米国の ROAK 社は、設備投資を国・研究機関が担い、現状の 4～5 倍の生産スピードアップで対応可能と回答している。日本の三菱重工業は、電子ビーム溶接（EBW）機器の増設と空洞 4 本同時 EBW 技術の導入により、年間 500 台の空洞製造は可能であると回答している。

また、ILC 向け空洞の量産化に向けた製造面での課題としては、空洞製造時間の短縮の取組み（部品数削減、材料変更、電子ビーム溶接工程の改善、レーザー溶接・TIG 溶接への変更等）、製造ラインの一部自動化（外観検査・周波数検査の自動化、自動化ソフトウェア開発等）、製造設備のアップグレードと大型化、生産労働力シフト制の導入（3 シフト制等）、大量部品・工程の品質管理（EDMS の導入等）、日本の高圧ガス保安法による規定のクリア（空洞は全数検査必要）などが指摘されている。

②クライオモジュール

「クライオモジュール」の量産化に向けた製造面での課題としては、モジュール組立レシピの標準化（共有）、クリーンルーム内のクリーン度向上（治具、排気システム等）、

クライオモジュール部品のクリーン度向上（ボルト等詳細部品の電解研磨 等）、日本へ長距離輸送（海上・航空）する際の衝撃・振動に強い特殊な輸送用フレームの開発などが指摘されている。

2) 高周波技術

①クライストロン

「クライストロン」の主な製造企業における量産化の可能性については、次のとおりである。欧州の Thales 社は、ILC 用マルチビームクライストロン (MBK) を年間 15 台製造可能と回答している（現在は年間 12 台）。米国の CPI 社は、MBK を月間 3～5 台は生産可能と回答している（現在は 1 台/3 ヶ月）。日本の東芝電子管デバイスは、MBK 量産の潜在能力はあるが、年間 20 台超の生産量になると他プロジェクト向け受注量を前提とする設備増強が必要であると回答している。

「クライストロン」の量産化に向けた製造面での課題としては、ボトルネックである品質検査時間の短縮、真空排気ベーキング装置及び試験装置 (MBK 専用のテストスタンド) の増強、製造スペース拡大、外部研究所設備を活用したエージング・試験の並行実施、MBK の調整作業 (動作パラメータの調整) の効率化などが挙げられている。

②カプラー

「カプラー」の主な製造企業における量産化の可能性については、次のとおりである。欧州の Thales 社は、新規設備投資無しで生産ペースの倍増 (年間 1,000 台) が可能であるとしている。米国の CPI 社は、現在の生産設備で 2 シフト制にすれば年間 1,200 台程度の生産は可能と回答している。日本の東芝電子管デバイスは、日本での必要生産量である年間 890 台のカプラー生産は現行工場設備では対応できないが、高レベルクリーンルームの設置等により対応可能と回答している。

「カプラー」の量産化に向けた製造面での課題としては、設備の増強・改善 (高レベルのクリーンルーム、EBW 設備、真空ろう付設備等)、高品質な銅メッキ技術の確立、生産人員の増強 (EBW の熟練技能者)、大量カプラーの監視・メンテナンス・故障発生時への対応、大量カプラーのコンディショニング体制の確立などが指摘されている。

3. ILC の「加速器製作におけるコスト削減に向けた取組」

ILC の加速器に関連する主要機器・コンポーネントの他との代替（コンパクトで高性能なもの）によるコスト削減の可能性と取組状況について欧米日の研究機関及び関連企業へのヒアリングした結果をまとめると、以下のとおりである。なお、全体として多くの事例は得られなかった。

①ニオブシートをインゴットから直接切出す方法による空洞のコスト削減

ニオブシートをインゴットから直接カットすることによって、現在使用されている圧延シートを使用する場合と比較してコストが安価になる。この技術が現在研究・実証中である。この技術による ILC におけるニオブ原料費の削減効果の詳細は検討中であるが、ニオブは ILC クライオモジュールの約 1 割のコストを占めるとされ、ILC では 18,000 台の空洞が製造されるため、原料費の削減は非常に大きなインパクトとなると推測されている。

②一体成型型の超伝導加速空洞の製造によるコスト削減

DESY では、ニオブチューブをフローフォーミングで製造、それをハイドロフォーミングにより 3 連空洞を一体成形し、それら 3 個を電子ビーム溶接で連結して 9 連化した（9 連一体成形は未実施）。これまで、3 本の 9 連空洞が製造され 27MV/m~35MV/m（加速勾配）を達成した。また、三菱重工では、深絞りで製造したニオブチューブをスピニング加工により一空洞分製造し、ハーフセルを両側から電子ビーム溶接して 2 連空洞を製作した。JLab（トーマス・ジェファークソン国立加速器施設）の協力を得て表面処理、加速電界評価を実施し、32.4MV/m を達成した。なお、両者とも現状の空洞に対するコスト削減効果についての正確な評価は未実施である。

図表2 ILC 主要技術・製造品別の達成状況・課題、開発・量産化の実現可能性（まとめ）

調査全体結果とりまとめ（超伝導加速器技術、クライオジェニクス技術）

主要技術・製造品項目	ILC必要量	ILC仕様・要求性能	研究/試験/ 製作主体	達成状況 ■プロトタイプの有無 ●要求性能達成度合い	課題 ■技術的課題 ●製造的課題(量産化)	開発・量産化の実現可能性	
						見通し	実現主体
超伝導加速空洞	18,000	■加速勾配 <500GeV運転時> ・製作時:35MV/m(90%) ・運転時:31.5MV/m	【欧州】 DESY, INFN RI社, Zanon社	■プロトタイプ有り ・E-XFEL用TESLA型空洞 ●要求性能ほぼ達成 ・全体平均で30MV/m達成(再処理後) ・推計:34MV/m(94%)<再処理3回>	■技術的課題 <加速空洞性能の向上> ・クリーンルーム改善(設備・性能の向上、熟練オペレータ育成、作業訓練等) ・製造工程改善(最終工程でEP、HPRによる再処理等) ・再処理回数増(3回実施となった場合の工程増) ●製造的課題 ・製造ラインの一部自動化(自動化ソフトウェア開発) ・製造設備のアップグレードと大型化 ・製造人員のシフト制(3シフト) ・大量部品・工程の品質管理(EDMSの導入) ・日本の高圧ガス保安法による規定のクリア(空洞は全数検査必要) ・適切な梱包システムの使用により長距離輸送には支障なし	◎	■開発・試験 ・DESY ●製造(量産化) ・RI社(独)、Zanon社(伊) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・Zanon社:空洞製造能力を2倍(設備・人員は1.6倍程度)にして年間400台の製造可能 ・RI社:空洞製造能力を労働投入増強(3シフト、週7日労働)、設備増強20%アップで年間500台の製造可能
			【米国】 JLab, FNAL AES社, ROARK社	■プロトタイプ有り ・CEBAF用TESLA型空洞 ・ILC R&D およびLCLS-II 用プロトタイプ空洞 (ILC と同等設計) ●要求性能ほぼ達成 ・縦測定で80台のC100タイプが35MV/m±20%の性能を達成	■技術的課題 ・現在、High efficiency high gradient (HEHG) SRFに向けて、形状、素材、加工面での検討 ・その他、medium field Q-slope及び電界放出を抑制する最終処理工程の検討 ●製造的課題 ・現状の4~5倍の製作速度が求められ、時間を要する電子ビーム溶接工程の改善等が必要 ・製造設備の転用が難しく、期間限定のため、民間の設備投資対象とはなりにくい	○	■開発・試験 ・JLab, FNAL ●製造(量産化) ・AES社, ROARK社, Niowave社 PAVAC Industries社 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・AES社:ILC7年間の製作期間で同社単体での設備投資は難しい ・ROARK社:設備投資を国・研究機関が担い、現状の4~5倍の生産スピードアップで対応可能
			【日本】 KEK 三菱重工	■プロトタイプ有り ・ILC向けSTF空洞(Tesla-like超伝導加速空洞)34台製作実績あり<三菱重工> ●要求性能ほぼ達成 ・標準レンピ製作空洞の平均加速勾配 35.2MV/m達成 (空洞No.12~26の平均) ・「4本同時電子ビーム溶接(EBW)設備で製造した最初の4本(No.27~30)は、性能にバラつきがあるが、経験値上昇により35MV/mを達成できる見込み	■技術的課題 ・4本同時電子ビーム溶接(EBW)設備の安定性向上 ・低コスト・高効率な空洞表面処理方法の開発 (バルス電流電解研磨、アルカリ電解研磨、縦型電解研磨装置等) ・空洞の内面検査装置の開発(空洞表面温度分布計測装置、放射線計測装置等) ・低コストで効率的な空洞縦測定装置の開発 ●製造的課題 ・空洞製造時間の短縮の取組み(部品数削減、材料変更、レーザー溶接・TIG溶接への変更等) ・ILC向けの表面処理レンピ・装置の最適化 ・外観検査及び周波数検査(プリチューニング)の自動化 ・生産労働カシフト制の導入 ・高圧ガス保安法による空洞の合格証発行からクライオモジュール完成検査までの有効期限への留意	◎	■開発・試験 ・KEK ●製造(量産化) ・三菱重工、日立製作所、東芝 他 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・三菱重工:EBW機器の増設と空洞4本同時EBW技術の導入により、年間500台の空洞製造可能
超伝導加速器技術	1,855	■加速勾配 ・運転時:31.5MV/m	【欧州】 DESY/INFN, CEA-IRFU ALSYOM社	■プロトタイプ有り ・E-XFEL用クライオモジュール(FLASH用タイプIIIモジュールの改良型) ●要求性能未達 ・平均27.2MV/m =ILC目標の86%水準 (E-XFEL用モジュール60台の平均値<DESY測定>) ・平均 29 MV/m (モジュール60台以降の最新実績<DESY測定>)	■技術的課題 <性能低下(Degradation)の克服> ・空洞モジュールの性能低下(約6%)の原因解明と対処 (なお、モジュールの分解による直接検証は困難) ・複数クライオモジュールの連結による性能実証が必要 ●製造的課題 ・モジュール組立レンピの標準化(共有) ・部品管理、品質管理、製造管理 等 ・日本へ長距離輸送(海上・航空)する場合に課題あり (衝撃・振動に強い特殊な輸送用フレームの開発、標準40フィートコンテナとの整合等)	○	■開発・試験 ・DESY, CEA-IRFU ●製造(量産化) ・Zanon社(伊): コールドマス ・ALSYOM社(仏):アセンブリ @ CEAサイト
			【米国】 JLab, FNAL	■プロトタイプ有り ・ILC R&D プロトタイプの性能試験済み ・LCLS-IIプロジェクトで1.3GHz、9-cell Cavity向けクライオモジュールを製作 ●要求性能達成 ・FNAL保有の8Cavity実装モジュール1台のテストで平均32.2MV/mを達成 (LCLS用実証モジュールは、2018年9月までに生産される予定)	■技術的課題 ・課題抽出にはILC-CMIによるテスト及びトンネル内でのテストが必要 ・ビームラインの接合時の埃等の混入回避策が課題(移動式高性能クリーンルームによる実証) ●製造的課題 ・7年間、すべてのラインと人材をILC用に使用することで製作可能	○	■開発・試験 ・JLab, FNAL ●製造(量産化) ・JLab, FNAL及び協力企業
			【日本】 KEK 三菱重工、日立製作所	■プロトタイプ有り ・KEKのSTFで実施したILC-S1グローバル向けのクライオモジュールの製造実績あり ●要求性能未達 ・KEKでクライオモジュールの性能検証済み	■技術的課題 ・現時点ではモジュール単体の製造技術的課題はなし ・複数モジュールを連結した際の性能保持が課題 ●製造的課題 ・クリーンルーム内のクリーン度向上(治具、排気システム等) ・クライオモジュール部品のクリーン度向上(ボルト等詳細部品の電解研磨等) ・日本では最適な組立場所の立地最適化が課題(既存工場、ILCサイトのいずれが適切かの検討等)	○	■開発・試験 ・KEK ●製造(量産化) ・三菱重工、日立製作所
超伝導磁石			東芝(日) Babcock Noell社(独) 他	■プロトタイプ有り ・最終収束点用の超伝導磁石は開発済み(米) ・ILCメインライナック用の超伝導四極磁石は開発済み(日・米) ●要求性能達成	■技術的課題 ・超伝導磁石技術は確立済 ・支持機構および冷媒からの微弱振動が磁場精度に与える影響検証 ●製造的課題 ・品質管理 等	◎	●製造(量産化) ・東芝(日)、Babcock Noell社(独) 他
クライオジェニクスプラント	10基	■地下ユニット(冷凍機):2K ■地上ユニット:4.5K ■必要電力:50~60MW	GERN Air Liquide社	■プロトタイプ有り ・LHCクライオジェニクスプラント(同規模・技術、55MW) ・プラントを構成するコンポーネントの技術確立済 ●ILC要求性能達成	■技術的課題 <輸送・貯蔵技術に若干課題有り> ・長距離冷媒輸送ラインの冷却効率維持向上 ・ヘリウムロスの低減 ●製造的課題 特に無し	◎	●製造(量産化) ・Air Liquide社(仏)、Linde社(独・スイス)

評価ランク	定義
◎	プロトタイプ開発・実証済み。現技術の延長・改善又は小規模R&Dで「実機製作」や「量産化」が可能
○	プロトタイプ開発・実証済み。「実機製作」や「量産化」には、一部に技術的打開・突破や中規模R&Dが必要
△	プロトタイプ未開発・未実証。技術的打開・突破や大規模R&Dによるプロトタイプ開発が必要
×	基本技術が未確立・未実証。プロトタイプの実現性が不透明

調査全体結果とりまとめ(高周波技術)

主要技術・製造品目	ILC必要量	ILC仕様・要求性能	研究/試験/製作主体	達成状況 ■プロトタイプの有無 ●要求性能達成度合い	課題 ■技術的課題 ●製造的課題(量産化)	開発・量産化の実現可能性	
						見通し	実現主体
モジュレータ (マルクス型電源)	440	<ul style="list-style-type: none"> 出力電圧: 120kV 出力電流: 140A パルス平坦部: 1.65ms パルス繰返周波数: 5Hz 基本事項 コンパクト性、低コスト 高稼働率、保守容易性 	SLAC KEK	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ開発中 <ul style="list-style-type: none"> マルクス型電源(モジュレータ)は、次の3タイプあり <ol style="list-style-type: none"> ①SLAC-P2電源、②KEKチョップパ型電源、③DTI電源 ●要求性能未達成 <ul style="list-style-type: none"> 上記のタイプ①は研究停止、タイプ③は故障のため稼働していない。 タイプ②は、2ユニット(4セル/ユニット)製造し、KEKにて実証実験中 2016年に20ユニット(80セル)製造し、電源としての検証、長期連続運転試験を予定 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <マルクス型電源のプロトタイプ開発・実証> <ul style="list-style-type: none"> 分散開発(3タイプ)から脱し、体制・技術の集約化によるILC用プロトタイプ開発・実証 高速、大電流、高耐圧、低損失半導体スイッチの開発(半導体素子の開発も含む) パルスを発生させるハードウェアとそれを制御するソフトウェアの開発 長時間連続運転の実施による耐久性・安定性の実証 ●製造的課題 <ul style="list-style-type: none"> 民間企業との共同による電源の開発と技術・情報共有 複数ベンダーによる供給体制確立 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 <ul style="list-style-type: none"> KEK、パルスパワー技術研究所(日) SLAC ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> DTI社(米) パルスパワー技術研究所(日)
クライストロン	440	<ul style="list-style-type: none"> 周波数: 1.3GHz ピーク出力: 10MW 平均出力: 150kW 効率: 65% パルス幅: 1.65msec ビーム電圧: >120kV ビーム電流: <140A 	【欧州】 Thales社	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> Thales社製 10MWマルチビームクライストロン<TH1802> EXFELに23台納入実績あり 現状の技術でILCに対応可能 ●ILC要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 (一部あり) <ul style="list-style-type: none"> 長寿命カソード(陰極)の研究開発 ●製造的課題 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> Thales社(仏) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> Thales社: ILC用MBKの製造、年間15台可能と回答(現在は年間12台)
			【米国】 CPI社	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> CPI社製 1.3GHz 10MWマルチビームクライストロン <VKL-8301A/B> SLCで必要とされた約300台を生産、4,000時間(約7年程度)稼働した機器の修理も担当 現状の技術でILCに対応可能 ●ILC要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <ul style="list-style-type: none"> ILC TDRの仕様は満たしており特に無し ●製造的課題 <ul style="list-style-type: none"> 品質検査時間(ボトルネック)の短縮 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> CPI社(米) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> CPI社: MBKの生産台数月間3~5台は可能と回答(現在は1台/3ヵ月)
			【日本】 東芝電子管デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> 東芝電子管デバイス社製 10MWマルチビームクライストロン<E3736H> E-XFELに7台納入実績あり 現状の技術でILCに対応可能 ●ILC要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <ul style="list-style-type: none"> ILC TDRの仕様は満たしており特に無し ●製造的課題 <ul style="list-style-type: none"> 量産化には真空排気ベーク装置及び試験装置(MBK専用のテストスタンド)の増強必要(設備設置にはある程度大規模なスペースと高さが必要、増強は経済的合理性を考慮し判断) ILC関連の研究設備を活用したエージング、試験の並行実施(納入効率化に繋がる) (一般的課題)MBKの動作パラメータの調整等の作業の効率化 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> 東芝電子管デバイス(日) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> 東芝電子管デバイス: MBK量産の潜在能力はあるが、年間20台超の生産量になると、他PJ向け受注量を前提とする設備増強が必要
カプラー	16,000	周波数: 1.3GHz	【欧州】 LAL(コンディショニング) Thales社、RI社	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> EXFEL用TTF-III入カプラーを生産・納品済み(Thales・RIコンソーシアム) カプラー技術は確立済み ●要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <ul style="list-style-type: none"> 特に無し ●製造的課題(一部) <ul style="list-style-type: none"> EXFEL用カプラー製作初期段階では、銅メッキ(不良品率10%)、セラミックとのEBWIに問題が発生したが現在は全て解消 量産化に向けた生産施設の拡大 量産化に向けた生産速度増強(RFステーション、クリーンルームの改善) 量産化に向けた生産人員の増強(工程の中で重要なEBWの熟練技能者) 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ■試験・コンディショニング <ul style="list-style-type: none"> LAL ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> RI社(独)、Thales社(仏) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> Thales社: 新規設備投資無しで生産ベースの倍増(年間1,000台)可能
			【米国】 CPI社	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> EXFEL用TTF-III、LCLS-II入カプラーを生産・納品済み ILC用カプラー技術は確立済み ●要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <ul style="list-style-type: none"> 特に無し ●製造的課題(一部) <ul style="list-style-type: none"> EXFEL用カプラー生産の初期には多数の欠陥(大量のガス放出)発生したが、現在は解消 量産化に向けた生産コストの更なる削減 量産化に向けた生産人員の増強と訓練 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ■試験・コンディショニング <ul style="list-style-type: none"> 未定 ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> CPI社(米) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> CPI社: 現在の生産設備で2シフト制にすれば年間1,200台程度の生産は可能
			【日本】 東芝電子管デバイス	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り <ul style="list-style-type: none"> EXFEL用カプラーの試作品をLALに納入し性能確認評価完了(ただし、最終的にE-XFEL向けの量産カプラーの納入実績無し) ILC用カプラー技術は確立済み ●要求性能達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <ul style="list-style-type: none"> 特になし ●製造的課題(一部運用面の課題含む) <ul style="list-style-type: none"> カプラー製造のポイントとなる高品質銅メッキ技術の量産化へ向けた対応 量産化に向けた設備増強(高レベルのクリーンルーム、EBW設備、真空ろ付設備等) (一般的課題として)大量カプラーの監視、メンテナンス、故障発生時への対応(大量保守管理の体制、故障率の低減等) (一般的課題として)大量カプラーのコンディショニング体制の確立(研究所又は企業) 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ■試験・コンディショニング <ul style="list-style-type: none"> 未定 ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> 東芝電子管デバイス(日) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> 東芝電子管デバイス: 年間890台のカプラー生産は現行工場設備では対応できないが、高レベルクリーンルームの設置等により対応可能
LPDS (ローカルRFパワー供給システム) <導波管及び導波管コンポーネント>		<ul style="list-style-type: none"> 損失を最小化したRFの供給 空洞の入力パワーと位相のリモット制御 バラつきへ対応した平均加速勾配の最大化 	【日本】 KEK 日本高周波 古川C&B 等	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り(導波管、導波管コンポーネント) <ul style="list-style-type: none"> ILCで使用予定の500kWクラスの導波管の製造可能<日本高周波> KEK・STF向けの導波管、サーキュレータ、ダミーロード、真空窓、方向性結合器、電力分割器を納入<日本高周波等> 可変H-ハイブリッド、可変移相器<KEKで開発> 可変電力分配器<SLACで開発> ●要求性能ほぼ達成 <ul style="list-style-type: none"> ILC向けの導波管、導波管コンポーネントの技術は基本的に確立済み 一部に改良・改善の余地あり 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題(LPDS全体) <ul style="list-style-type: none"> LPDSのクライオモジュールへの取付け方法の検討 クライオモジュール体型のLPDSの実現と試験 ■技術的課題(導波管、導波管コンポーネント) <ul style="list-style-type: none"> 導波管や素子の溶接から錆物への変更 ダミーロードに入れる電波吸収体の改善・コストダウン 一部コンポーネントの改善・改良(可変H-ハイブリッド、可変移相器等) ●製造的課題(導波管、導波管コンポーネント) <ul style="list-style-type: none"> 導波管内放電抑制のための窒素、SF₆(六フッ化硫黄)ガスの取り扱い改善 サーキュレータに入れる磁石やフェライトの調達品質の維持 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ●製造(量産化) <ul style="list-style-type: none"> 日本高周波、古川C&B 他 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 <ul style="list-style-type: none"> 日本高周波: 100人規模の人員増、測定治具の増設によりILC向け量産化(週産25台)は可能。現在は、年間数十個が受注最大数

評価ランク	定義
◎	プロトタイプ開発・実証済み。現技術の延長・改善又は小規模R&Dで「実機製作」や「量産化」が可能
○	プロトタイプ開発・実証済み。「実機製作」や「量産化」には、一部に技術的打開・突破や中規模R&Dが必要
△	プロトタイプ未開発・未実証。技術的打開・突破や大規模R&Dによるプロトタイプ開発が必要
×	基本技術が未確立・未実証。プロトタイプの実現性が不透明

調査全体結果とりまとめ(ビーム技術)

主要技術・製造品項目	ILC必要量	ILC仕様・要求性能	研究/試験/製作主体	達成状況 ■プロトタイプの有無 ●要求性能達成度合い	課題 ■技術的課題 ●製造的課題(量産化)	開発・量産化の実現可能性		
						見通し	実現主体	
偏極電子源	2	<ul style="list-style-type: none"> ■バンチ繰返し率: 3MHz ■平均電流: 32μ A ■ピーク電流: 4.8A ■電荷量: バンチ当たり4.8nC ■偏極度: 80%以上 ■量子効率: 0.5%以上 	JLab SLAC 名古屋大学	<ul style="list-style-type: none"> ■フォトカソードの技術有り ・超格子カソード(ガリウム砒素とガリウム砒素リンの組合せ)が高性能 ●要求性能達成 ・スピン偏極度90%、量子効率QE1.6% →ILCの目標値を達成 ・カソードの寿命: ILCの条件に当てはめ32μ A出力で1カ月以上の連続運転達成(CEBAF) ■電子銃のプロトタイプ有り ・名古屋大学: NPES-3(200kV, load-lock付き) ・Jlab: CEBAF電子銃(100kV, load-lock付き, inverted gun方式電子銃) ●要求性能一部未達 ・ILC相当のシングルバンチの電荷量(NPES3の5.6nC)は達成済み ・電荷量4.8nC(1ns)かつ繰返し3MHzの同時生成は未実証 ■レーザーシステム(マルチバンチ)は未検証 ・マルチバンチ時間構造のレーザーシステム開発進展の報告無し(SLAC) ・FLASHのFEL seeding用レーザーシステムがILCレーザー仕様により近ILCに有用(DESY) 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題(フォトカソード) ・ILCの目標値はクリアしているが、高偏極度でより量子効率の高いカソード開発は有用 ■技術的課題(電子銃) ・電子銃は基本的にはSLC等で実証済みで技術的には完成していると認識 ・電子ビーム性能向上(広がりや輸送時損失を抑える)ためにはより高電圧の電子銃開発は有用(なお、500kV以上のDC電子銃開発が進行中、一部成功例あり) ■技術的課題(レーザー) ・マルチバンチ時間構造のレーザーシステムはOPCPA方式で可能。ただし、ILC電子源用に繰返し、パルス幅を合わせた実証機の開発必要 ・波長780nmのレーザーを作ることが課題 ■技術的課題(総合) ・総合試験を行うための環境整備が重要(電子銃、フォトカソード、レーザーシステム、及びビーム評価システムを1つのシステムとして揃える) 	○	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・SLAC、Jlab、名古屋大学、KEK、JAEA ・DESY(Laser開発) ・Mainz大、Bonn大(電子銃開発) ・Novosibirsk(フォトカソード開発) 	
陽電子源 (ヘリカルアンジュレータ)	1 (60)	<ul style="list-style-type: none"> ■バンチ数: 1,312(パルス当り) ■陽電子エネルギー: 5GeV(DR入射時) ■アンジュレータタイプ: ヘリカル ■アンジュレータ全長: 147m 	STFC-Daresbury Lab SLAC	<ul style="list-style-type: none"> ■アンジュレータのプロトタイプ有り ・ILC向け超伝導ヘリカルアンジュレータモジュール(4m) <STFC開発> ●要求性能一部達成 ・磁場強度は、ILCの設定レベルを30%上回る(達成) ・磁場精度は、振幅一様、磁場積分値=0(やや不足) ・クライオジェニック部分の性能は低かった(その後改善) 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 ・実装するにはビーム試験の実施が重要(6mmのビームパイプを通るビームを使った実証) ●製造的課題 ・企業との協働による量産化プロトタイプモジュールの製作 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・STFC-Daresbury Lab ●製造(量産化) ・英国企業 他 	
陽電子源 (標的)	1		RAL LLNL	<ul style="list-style-type: none"> ■標的のプロトタイプ開発中 ・水冷方式は不調であった ・水冷方式によらない標的冷却方式として2タイプあり ①Sliding contact cooling方式、②Radiation cooling方式 ●要求性能未達成 ・タイプ①は、接触させる部品を開発中 ・タイプ②は、まだ設計最適化の段階 		<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <標的の開発> ・冷却技術の確立とプロトタイプの開発(冷却技術の目的が立つまでに最低2年程度必要) ・性能保障のためにビーム試験が必要(代替的にはレーザーを用いた実証必要) ・いずれの冷却方式でも、部品(消耗品)交換をリモートで行う技術の開発が必要 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・未定
陽電子源<バックアップ> (電子駆動方式)	1		KEK	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ製作中(標的) ・2015-16年度にモデル製作 ■プロトタイプ一部有り(要素技術) ・駆動用の電子ビームリニアック(KEK)、AMD(SuperKEKB)等 ●要求性能一部未達成 ・標的回転速度5m/s ・陽電子収量(シミュレーション)3×10¹⁰/バンチ(KEKB等の経験によりシミュレーションは実際と合致) ・標的(回転体の軸シール)は未実証 	<ul style="list-style-type: none"> ■基本的課題 ・電子駆動方式は、「偏極陽電子が得られない」という特性を持つため、ILC素粒子実験スキームとの整合・調整が必要 ■技術的課題(標的) ・標的のプロトタイプの開発・実証が必要 ・回転軸シールのモデル開発・実証が必要(回転体のシールの耐放射線性の試験、シール材劣化の検証等) ■技術的課題(システム全体) ・AMD、プースターライナックの設計必要 ・確立された要素技術を組合せた一つのシステムとしての総合試験が重要 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・KEK(日) 	
ダンピングリング(DR)		<ul style="list-style-type: none"> ■DR周長: 3.2Km ■低垂直エミッタンス: 	INFN-LNF SLAC KEK	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り(先端要素技術の実験・開発多数有り) ・第3世代光源(Diamond、ASLS、ESRF、SLS、SSRF等)で要素技術は実証 ●要求性能ほぼ達成 ・既存の電子陽電子コライダー及びシンクロtron光源のうち数基は、ILCのDRに必要なビーム性能と同等の性能(超低エミッタンス、バンチ数、バンチ間隔等)を達成 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <入射/出射技術の開発> ・ILC入射・出射システムの重要要素(パルス立上り・下り時間、パルスの繰返し率、キックの振幅・振幅安定性等)は個別にはほぼ達成。ただし、同時達成に向けたさらなる研究開発が必要 ・高速キッカーの長期運転時の安定性と信頼性の評価が必要 ・高速キッカーのパルス電源の性能向上が望ましい(現在KEK等で開発中) ■技術的課題 <電子雲緩和技術の開発> ・電子雲の不安定性を軽減する真空システムの開発(SuperKEKBへ導入される不安定性抑制技術により確立される予定) 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・INFN-LNF(伊) ・SLAC(米) ・KEK(日) 他 	
ビーム制御 (DR周回ビームの高速フィードバックシステム)	1		INFN-LNF	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ無し ・一部の技術はINFN-LNFのDAΦ NEで使用しているものを利用可能(ストリップライン及び空洞キッカー等) ・現在建設中のSuperKEKBのシステムを利用可能(エネルギー、バンチ数、ビーム電流等のパラメータがILCに近い) ●要求性能未達成 ・ILC-DRのパラメータでのフィードバックシステムの性能検証は未実施 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 ・ILC-DR仕様での高速フィードバックシステム(試作システム)の研究開発(高いサンプリング周波数達成、高ビット数のアナログ・デジタル変換等の技術開発) (距離の短いバンチの大量処理、超低雑音システム導入等の技術開発) 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・INFN-LNF(伊) 	
ビーム制御 (衝突点の高速ビームフィードバックシステム)	1		JAI KEK	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ有り ・JAIによる試作システムが開発済み(=マルチバンチビーム監視制御システム) ・同システムは、KEK・ATF2のビームラインに配備され実証済み ●要求性能達成 ・BPM空間分解能、BPM信号処理レイテンシー、デジタルコントローラの動作スピード、ドライバアンプの性能、閉ループフィードバックレイテンシー等 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 ・ILCに多く使われるビーム診断機器の横断的(transverse)な計測技術の研究 ・ATFでは高分解能BPMシステムの開発が必要であるが、ILCには不要(ATFの仮想衝突点のBPM信号を処理する回路開発等) ●製造的課題 ・空洞型ビーム位置モニター(CBPM)の工業化による価格低減 	◎	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・JAI(英) ・KEK(日) ・SLAC(米) 	
ビームダンプ	4	<ul style="list-style-type: none"> ■容器形状: 円筒形ステンレス(直径1.8m×長さ11m) ■容器内: 10気圧の高圧水 ■18MW×4台(電子・陽電子各2台) 	無し	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ無し ・ILC仕様のダンプの試作は未実施(SLACの2.2MWダンプを基準にした設計はあり) ●要求性能未達成 ・性能は未実証(SLACの2.2MWダンプをもとにした、シミュレーションはあり) 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 <窓の耐久性等の実証> ・事故により窓の1点にバンチが集中し窓が破壊された場合の事故対策 ・高強度放射線環境下の冷却水による窓材の腐食等耐久性の検証 ■技術的課題 <放射性物質の安全管理> ・ダンプビームにより発生する放射性物質(トリチウム等)の安全管理技術 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・未定 	
クラブ空洞システム	2 (空洞)	<ul style="list-style-type: none"> ■空洞: 3.9GHz 超伝導9セル空洞 ■クライオモジュール ■カプラー: LOM,SOM,HOM 	コッククロフト研究所 FNAL SLAC	<ul style="list-style-type: none"> ■プロトタイプ無し ・空洞: ILC仕様の9セル空洞(カプラー装着)のプロトタイプ無し。1セル空洞での実験のみ ・クライオモジュール/クライオスタット: 設計無し。 ・カプラー: HOMカプラーの再設計必要。LOM、SOMカプラーは設計完成 ●要求性能未達成 ・空洞: 1セル空洞2台による実験のみで、性能未実証 ・カプラー: 実験によりHOMカプラーはビームの適切なダンピングできず 	<ul style="list-style-type: none"> ■技術的課題 ・超伝導9セル空洞のプロトタイプ(カプラー装着)の製造、実証 ・クライオモジュール/クライオスタットの設計とプロトタイプの製造、実証 ・HOMカプラーの再設計、製造、実証 ・2つのクラブ空洞間の同期運転、実証 ●製造的課題 ・空洞のシンクロに必要な3.9GHz-LLRFボードの商業ベース生産化 	△	<ul style="list-style-type: none"> ■開発・試験 ・STFC(コッククロフト研究所)(英) ・FNAL(米) ・SLAC(米) 	

図表3 ILC 量産コンポーネントの製造・アセンブリ・試験ライン別処理能力<(現状・将来)> × (欧州・米国・日本) >

【欧州】 ILC量産コンポーネントの製造・アセンブリ・試験ライン別処理能力の比較 (アンケート、ヒアリング結果より)

ILC量産化コンポーネントの必要生産量(製造期間6年)

比較指標⇒

(単位:台)

	ILC全体必要生産量		年間必要生産量 (製造期間:6年)		
	全体合計	日米欧1極当り	全体合計	日米欧1極当り	1極1社当り(※)
加速空洞	18,000	6,000	3,000	1,000	500
クライオモジュール	1,855	617	309	103	52
カプラー	16,000	5,333	2,667	889	444
クライストロン	440	147	73	24	12

(※)1極当り2社で製造すると仮定

現状/将来	項目 (単位)	企業・研究機関								
		RI社	Zanon社	DESY	DESY	ALSYM社	RI社	THALES社	LAL	
現状	■機器名	加速空洞(EXFEL用)	加速空洞(EXFEL用)	加速空洞(EXFEL用)	クライオモジュール	クライオモジュール	カプラー	カプラー	カプラー	
	■ラインタイプ	製造	製造	性能試験	性能試験	アセンブリ	製造	製造	性能試験	
	・ライン1:工程	機械的製造		空洞垂直試験 (AMTF)		アセンブリライン	製造		クリーンルーム作業	
	・ライン2:工程	表面処理		空洞再処理・修理 (HALL3)			表面処理		RFコンディショニング	
	・ライン3:工程			クライオモジュール試験 (AMTF)						
	■処理能力(週間)	ユニット	4	4~4.5	10	1.2(最近1.5)	8	8	8~10	
	■処理能力(月間)	ユニット		16~18	40	4	5	32	32	40~50
	■処理能力(年間)	ユニット	200	192~216	480	50	55	400	400	480~600
	■施設全体面積	m ²	3,000	1,500	2,460		2,500			150
	・ライン1:面積	m ²	2,000	500	480		2,500			60
	・ライン2:面積	m ²	1,000	1,000	530					90
	・ライン3:面積	m ²		(ライン2+3↑)	1,450					
	■人員 合計	人	60	50	103		33			9
	・マネジメント、事務	人	4	2	17		8	4		3
	・技能工、エンジニア	人	56	48	86		25			6
	■設備投資額(累積)	百万€	12		41					3.4
					(AMTFのみ↑)					
	■オペレーション費用(年間)	十万€			35					3
					(電気+液体He↑)					
将来 (ILC実現時)	■処理能力(週間)	ユニット	10		15	1.5		20	20	
	■処理能力(月間)	ユニット					10			80~100
	■処理能力(年間)	ユニット	500				100	1,000	1,000	960~1,200
	■施設全体面積	m ²					3,500~5,000			300
	・ライン1:面積	m ²								120
	・ライン2:面積	m ²								180
	・ライン3:面積	m ²								
	■人員 合計	人					62~65			17
	・マネジメント、事務	人					12~15			5
	・技能工、エンジニア	人					50			12
	■設備投資額(追加)	百万€								8
■オペレーション費用(年間)	十万€								7	

【米国】 ILC量産コンポーネントの製造・アセンブリ・試験ライン別処理能力の比較（アンケート、ヒアリング結果より）

ILC量産化コンポーネントの必要生産量（製造期間6年）

（単位：台）

比較指標⇒

	ILC全体必要生産量		年間必要生産量（製造期間：6年）		
	全体合計	日米欧1極当り	全体合計	日米欧1極当り	1極1社当り(※)
加速空洞	18,000	6,000	3,000	1,000	500
クライオモジュール	1,855	618	309	103	52
カプラー	16,000	5,333	2,667	889	444
クライストロン	440	147	73	24	12

(※)1極当り2社で製造すると仮定

現状/将来	項目	(単位)	企業・研究機関									CPI	CPI
			ROARK社	AES	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Fermi Lab	Fermi Lab	Fermi Lab		
現状	■機器名		加速空洞 (ILC未達成)	加速空洞	加速空洞	加速空洞	クライオモジュール	クライオモジュール	加速空洞	クライオモジュール	クライオモジュール	カプラー	クライストロン
	■ラインタイプ		製造	製造	製造	性能試験	性能試験	アセンブリ	性能試験	性能試験	アセンブリ	製造	製造
	・ライン1: 工程		機械製造のみ	試験を除く製造	表面加工及び、 チューニング	空洞垂直試験、クライオモジュール試験、及び、アセンブリ			空洞垂直試験、クライオモジュール試験、及び、アセンブリ			製造全般	製造全般
	・ライン2: 工程												
	・ライン3: 工程												
	■処理能力(週間)	ユニット							2			1	
	■処理能力(月間)	ユニット	2		25	※72	1	2		※1	※4	16~24	0.3~0.4
	■処理能力(年間)	ユニット		50			12	22	150	※12			4
	■施設全体面積	m ²		2,043	5574							17,000	
	・ライン1: 面積	m ²		1486	3521	2,322							
	・ライン2: 面積	m ²											
	・ライン3: 面積	m ²											
	■人員 合計	人	※~9	19	10	37			10				
	・マネジメント、事務	人	※~1	4	4	24			1				
	・技能工、エンジニア	人	※~8	15	6	13			9				
■設備投資額(累積)	百万\$												
■オペレーション費用(年間)	十万\$												
将来 (ILC実現時)	■処理能力(週間)	ユニット											
	■処理能力(月間)	ユニット										※60	3~5
	■処理能力(年間)	ユニット		※100									
	■施設全体面積	m ²	ILC計画を想定した、具体的な追加の設備投資計画は確認されない。 既存の研究に必要な施設での製造が基本となる。										
	・ライン1: 面積	m ²											
	・ライン2: 面積	m ²											
	・ライン3: 面積	m ²											
	■人員 合計	人											
	・マネジメント、事務	人											
	・技能工、エンジニア	人											
■設備投資額(追加)	百万\$												
■オペレーション費用(年間)	十万\$												
	備考	-	※ダブルシフトを適用する など既存の人員規模を 維持したと仮定	※全体(85人)の約10% としてNRが推計	※LCLSII用には144ま で可能	-	-	-	※Jefferson Labの処理 能力と同様と仮定	※CEBAFラインをILCライ ンに改装した場合に 1CM/1month追加が可 能	※最大であり、最低2 年ほどの準備期間は 必要	-	

【日本】 ILC量産コンポーネントの製造・アセンブリ・試験ライン別処理能力の比較（アンケート、ヒアリング結果より）

ILC量産化コンポーネントの必要生産量（製造期間6年）

（単位：台）

比較指標⇒

	ILC全体必要生産量		年間必要生産量（製造期間：6年）		
	全体合計	日米欧1極当り	全体合計	日米欧1極当り	1極1社当り(※)
加速空洞	18,000	6,000	3,000	1,000	500
クライオモジュール	1,855	617	309	103	52
カプラー	16,000	5,333	2,667	889	444
クライストロン	440	147	73	24	12

(※) 1極当り2社で製造すると仮定

現状/将来	項目	(単位)	企業			
			三菱重工	東芝電子管デバイス	東芝電子管デバイス	日本高周波
現状	■機器名		加速空洞 (TESLA-like型)	マルチビームクライストロン	カプラー	導波管・素子
	■ラインタイプ		製造	製造	製造	製造
	・ライン1: 工程		加速空洞製造			
	・ライン2: 工程		空洞表面処理			
	・ライン3: 工程		空洞検査、性能評価			
	■処理能力(週間)	ユニット				
	■処理能力(月間)	ユニット				
	■処理能力(年間)	ユニット		量産の潜在能力あり		数十個
	■施設全体面積	m ²				
	・ライン1: 面積	m ²				
	・ライン2: 面積	m ²				
	・ライン3: 面積	m ²				
	■人員 合計	人				
	・マネジメント、事務	人				
	・技能工、エンジニア	人				
■設備投資額(累積)	百万€					
■オペレーション費用(年間)	十万€					
将来 (ILC実現時)	■処理能力(週間)	ユニット				<逆算した必要量> 25台(※4)
	■処理能力(月間)	ユニット				
	■処理能力(年間)	ユニット	500程度	20程度(※2)	年間890台は、現行工場設備では対応できない(※3)	
	■施設全体面積	m ²				
	・ライン1: 面積	m ²				
	・ライン2: 面積	m ²				
	・ライン3: 面積	m ²				
	■人員 合計	人				
	・マネジメント、事務	人				
	・技能工、エンジニア	人				
■設備投資額(追加)	百万€					
■オペレーション費用(年間)	十万€					
			(※1) 4本同時電子ビーム溶接技術の適用により可能	(※2) 他プロジェクト向け受注量を前提とする設備増強が必要	(※3) 高レベルクリーンルームの設置等により対応可能	(※4) 100人規模の人員増、測定治具の増設等により可能

II. ILC の主要技術・コンポーネント別の技術的実現可能性の検討

1. 超伝導加速器技術

1) 加速空洞の素材（ニオブ）

(1) ILC の TDR（技術設計報告書）ベースラインに示される技術の概要
TDR では、圧延ニオブシートから加速空洞が作られることになっている。

(2) ILC の PR（進捗報告書）に示される技術改善及び最新開発・製造実態

① ILC の PR（Progress Report：進捗報告書、2015）

<5.1 超伝導高周波加速空洞及びクライオモジュールの設計と組込み>

ニオブ製造者との議論により、圧延シートの代わりに粒径が制御されたインゴットから直接切り出したシートを使用することにより、コスト削減につなげ、表面のなめらかさや加速器の安定性をよりよくコントロールする道が開かれつつある。

<10.2 超伝導高周波技術>

ニオブシートをインゴットからカットすることで、上で検討したように現在使用されている圧延シートを使用する場合と比較してコストが安価になり、表面を一層きれいにすることができる。準備資金が整えば、この開発は優先課題となる。

図表 II-1 超伝導加速空洞の材質（ニオブ）のコスト削減努力

従来	新たな努力: 量産コスト制御
<ul style="list-style-type: none">• Nb ingot >>> RRR 300• 鍛造<ul style="list-style-type: none">- >> 圧延- >> シート- 問題点:<ul style="list-style-type: none">• 圧延による不純物巻き込み• 圧延部分でのコストがやく半分を占める。	<ul style="list-style-type: none">• Nb Ingotからの直接切り出し<ul style="list-style-type: none">- 半導体ウエファ、太陽電池パネルなどで、工業的に確立された技術- 純粋Nbシートの切り出し- RRR: 300 → ~100 可能性- コスト削減が可能- Grain-size の制御が課題

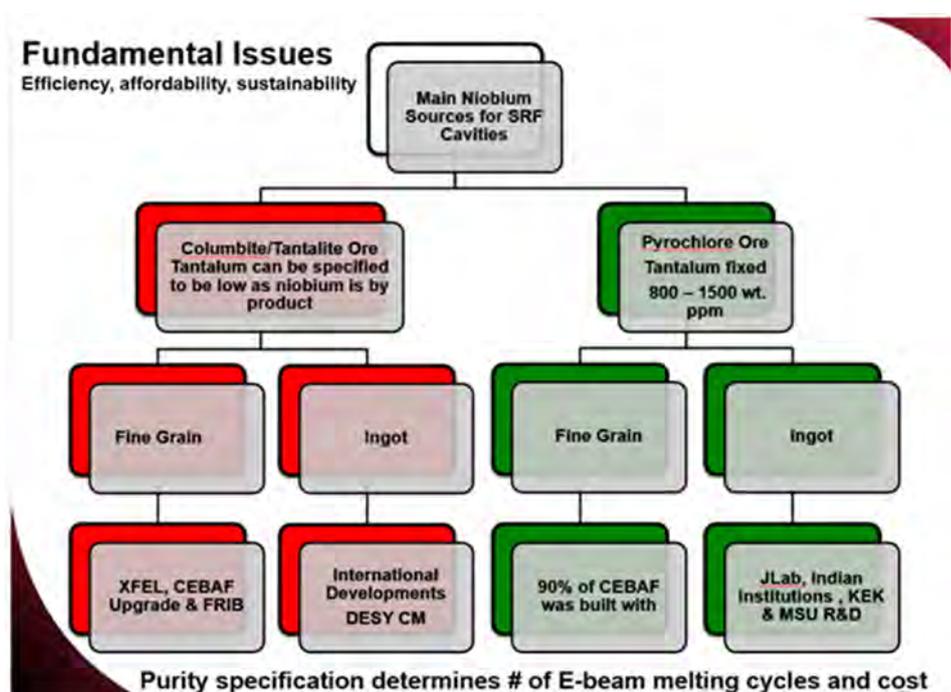
(出典)「TDR 後の ILC 技術設計・開発の進展」ILC プログレスレポート補足説明資料、2015.07.23、LCC 及び KEK

②最新開発・製造実態

a) Jefferson Lab における開発

現在、4種類のニオブ精製技術が研究されており、最も一般的なものは純度を向上させた粉末状のニオブ (Fine-grain) を用いた方法である。しかしながら、Jefferson Lab (以降、JLab と記載) や KEK、MSU (ミシガン州立大学) とニオブ精錬企業などが連携した検討・研究により、パイロクロア・インゴット (Pyrochlore ingot) からの製造方法が確立されようとしている。

図表 II-2 ニオブ精製技術の体系図

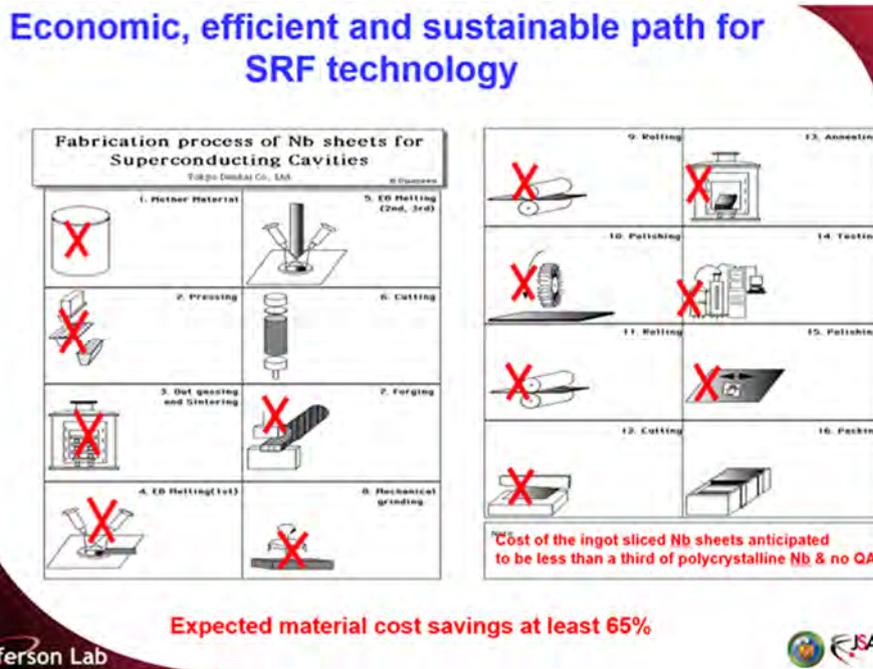


(出典) JLab 訪問ヒアリング時入手資料

インゴットから直接シートを切出す方法では、基本的に不純物の混入を防ぎ、表面の純度を保つことができるとともに、切出し以外のすべての段階 (鍛造、圧延、研磨などの工程) を除くことができる。これによって、圧延法による Fine-grain シートと比較して大幅なコスト削減も見込まれる。電子ビーム溶解プロセスでは HC などの不純物を避けるためにニオブを溶媒に浸しておかなければならないが、インゴットを用いた方法では、常温環境で製造することができる。ただし、DESY において過去にインゴットから試験的に製造された際、インゴット製造を担当した企業で、Ta (タンタル) が残留、または直接ニオブに入り込む「インクルージョン」と呼ばれる現象が発生し、純度が下がるという事例が報告されている。

JLab が実施した、DESY の Fine-grain から精製された加速空洞との比較実験では、インゴットから製造された加速空洞がより高い Q 値 (一定の電界強度を達成するために必要な電力量を表す数値。数値が高いほど電力損失が少なく高性能) を示した。

図表 II-3 インゴットから直接シートを切出す方法のプロセス

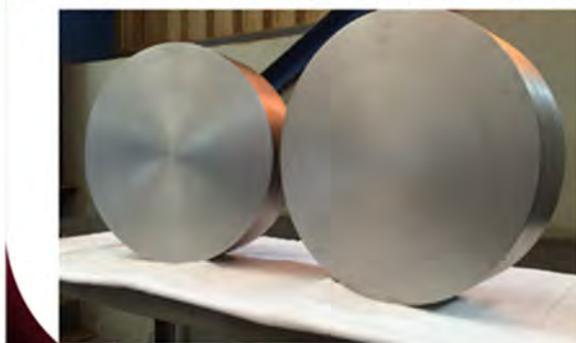


(出典) JLab 訪問ヒアリング時入手資料

写真(下)は世界で最も大きなニオブインゴットで、直径、厚さともに50cmほどである。インゴットを用いた製造方法において、マルチワイヤー切り取りが実施された場合の1スライスに掛かるコストは約\$50~100ほどである。切り取り技術はJLabやRI社、KEK及び東京電解社などが保有し、特許についてはJLab、CBMM社が米国で、KEK及び東京電解社が日本でそれぞれ保有している。切り取りを行う機械については、日本と欧州の企業が開発・生産するが、米国でも開発をJLabと共同で行う予定となっている。

写真：世界で最も大きなニオブインゴット

Worlds Largest High Purity Niobium Ingot (CBMM) for ESS prototypes (up to ~ 530 mm)



(出典) JLab 訪問ヒアリング時入手

(3) インゴットを用いた製造方法の評価及び技術的課題

①インゴットを用いた製造方法によるコスト削減効果の評価<JLab、KEK>

インゴットを用いた製造方法は、ILC の建設と運用のコストを下げることを可能とする技術になると考えられる。

この技術による ILC におけるニオブ原料費の削減効果の詳細は検討中であるが、LCLS-II における検証では、原料費を約 50%削減できるとされている。ILC クライオモジュールのうち空洞部分は 3 割、その中で原料はさらに 3 割を占めることから、ニオブはクライオモジュールの約 1 割のコストであるということになる。ILC では 18,000 台の空洞が製造されるため、原料費の削減は非常に大きなインパクトとなると考えられる。

②インゴットを用いた製造方法によるニオブ供給制約解消効果の評価<JLab、KEK>

この製法を用いることにより、活用可能なニオブの量（材料取りの歩留り）が向上することを含み、国際的なニオブ供給量の問題は基本的に解決すると考えられる。ニオブを供給している CBMM 社（ブラジル）は年間 2,000 トンものインゴットの供給が可能としており、ILC に必要なニオブが 1 年で供給可能になるという計算になる。さらに、複数社からの供給方針を維持することにより、適切な市場競争も保たれる。

③インゴットを用いた製造方法の研究開発課題<JLab、KEK>

少ない精錬工程によるインゴットを用いた製造方法では、多数回電子ビーム精錬を繰返した後の圧延工程による微小結晶粒ニオブ（Fine-grain）を用いた製造方法では大きな問題としなかった、主不純物である Ta 残留の可能性がある。

加速空洞を構成する素材に不純物が混入することにより Q 値が向上することについては、例えば、米国の LCLS-II で不純物の混入を人工的に行う窒素ドーピングで超伝導加速空洞の性能が向上するという研究がある。

しかし、不純物としての Ta は RRR（Residual Resistance Ratio：残留抵抗比）の値を低下させるが、高周波電解性能にどのように影響するかは、今後取組むべき評価課題である。このことから、Ta 残留量の管理の最適化が課題とされている。

2) 超伝導加速空洞

(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC の主線形加速器は、ビームを 15GeV から最大エネルギーの 250GeV まで加速する。各線形加速器におけるビーム加速は、2K で動作する 9 個の円型セルで構成される約 1m 長の超伝導ニオブ空洞約 7,400 台によって提供される (それらの空洞は約 850 のクライオモジュールに組み込まれる)。空洞の平均勾配は、500GeV 重心系エネルギーに対して 31.5MV/m (ただし、 $Q_0 \geq 10^{10}$ において) である。空洞対空洞の勾配に対する許容範囲は $\pm 20\%$ である。

空洞パッケージには、調整可能高出力カップラー、機械式空洞チューナーが備わっており、このチューナーは空洞のチタン製ヘリウム容器外筒に組み込まれる。

写真：1.3GHz 超伝導 9 セルニオブ空洞



(出典) TDR

(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

< 10.2 SRF 技術 >

加速空洞のコストを低減し、特に 1TeV へのエネルギーのアップグレードの可能性を探るなど性能の一層の向上に向け、様々な取り組みを継続することも重要である。検討すべき重要課題には以下が挙げられる。

- ニオブシームレスシリンダーまたは銅シームレスシリンダーの液圧成形。ニオブまたはその他の先端超伝導材料を用いた表面コーティング開発の継続
- 先端素材及び表面処理とドーピング技術を用いた、高勾配かつ高品質加速空洞の実現

② 最新開発・製造実態

a) European XFEL 用超伝導加速空洞の製造実態 < 欧州 >

【空洞の生産状況】

ILC 用の超伝導加速空洞の原型は、DESY の TESLA 型空洞であり、現在 European XFEL (欧州 X 線自由電子レーザー計画、以降 E-XFEL と表記) で使用中のものである。E-XFEL の必要加速空洞数 800 台の製造は、既に Zanon 社と RI 社によって達成されている (最終的な生産数は余剰分を含む 840 台)。現在両社は生産終了段階にあり、性能の悪い加速空洞の修復作業などを行っている。

Zanon 社と RI 社の納入実績や特徴については、次図表のとおりである。両社は空洞を概ね似通った手順で作っているが、一部空洞の表面処理工程が異なる。その結果、Zanon 社の空洞は RI 社の空洞と比較して、加速勾配が平均 3MV/m 低くなっている (E-XFEL の要求仕様は満たしている)。

図表 II-4 Zanon 社と RI 社における E-XFEL 用超伝導加速空洞の比較

項目	Zanon 社	RI 社
空洞製作台数	420 台 (2011~2015 年)	420 台
空洞製造能力	4 台/週 (ピーク時 5 台/週) 200 台/年	4 台/週 (ピーク時 5 台/週) 200 台/年
空洞の性能	最大 40MV/m 8%が 35 MV/m 以上 35%が 30 MV/m 以上	最大 33.2 MV/m (HPR 処理前) 最大 35.0 MV/m (HPR 処理後) ※HPR:高圧洗浄
部品内製化度合い	空洞を構成する全てのコンポーネントを自社内で製造	空洞のチタニウムタンク (チタンジャケット) は外部から調達
製造工程	<第一次表面処理> バルク EP (140 マイクロン) <最終表面処理> BCP (10 マイクロン) ※EP:電解研磨、BCP:化学研磨	<第一次表面処理> バルク EP (140 マイクロン) <最終表面処理> EP (40 マイクロン) ※EP:電解研磨

(出典) ヒアリング結果をもとに野村総研作成

E-XFEL における余剰分 20 台の加速空洞は、欠陥品 (全体の 1%) 及び初期に生産した参考用のものである。参考用の加速空洞は実機での使用に足るものであれば利用していく予定となっている。

RI 社及び Zanon 社から DESY に納品された加速空洞は、加速器モジュール試験施設 (AMTF: Accelerator Module Test Facility) において試験が行われる。空洞試験用のテストスタンドは 2 組 (1 台×4 空洞の同時試験可能) あり、1 週間で合計 8 個の試験を行っている。キャパシティとしては、1 週間に最大 12 個まで試験を行うことが可能である。

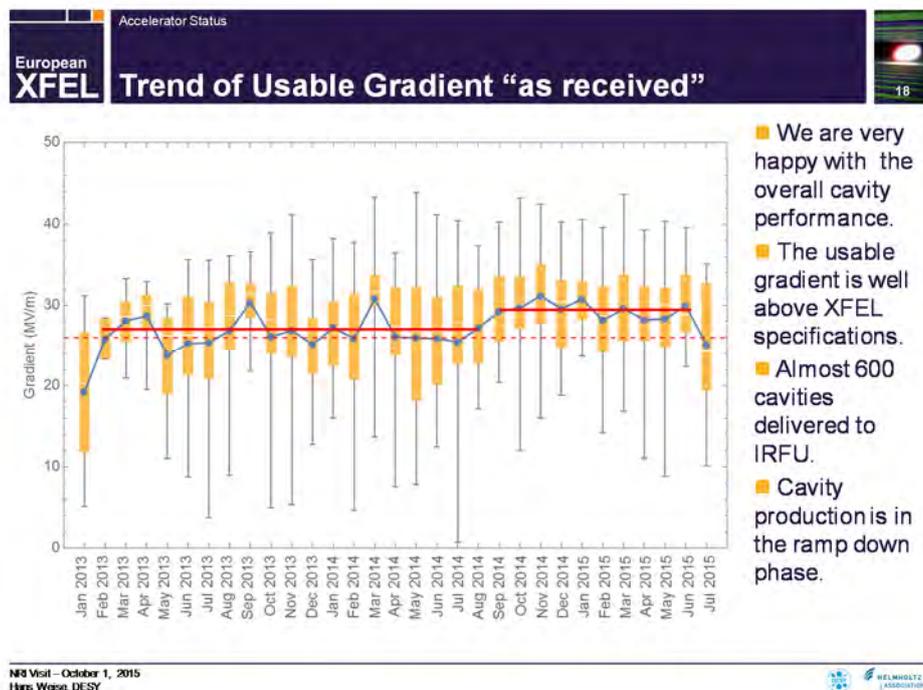
【空洞の性能試験結果】

E-XFEL 用の加速空洞の加速勾配の設計値は 23.6MV/m、安全マージン込みで 26MV/m 以上を目標値としている。E-XFEL 空洞のこれまでの試験結果では、ILC・TDR に明記されている製造及び表面処理の方法 (最後の EP プロセス付) によって得られた平均運転加速勾配は、約 30MV/m となっている。

なお、縦測定 (VT: Vertical Test) による加速勾配で実際にクエンチを起こさせ、空洞の限界値を測定すると 31.3MV/m であった。ただし実際には電界放出 (FE: Field Emission) が起きるため、FE が一定以下に収まることを要求した場合、性能の平均値

は 27.7MV/m とやや落ちた（これを Usable Gradient と定義）。

図表 II-5 E-XFEL 空洞の加速勾配（Usable Gradient）の推移



（出典）DESY 訪問ヒアリング時配布資料

b) ILC 用超伝導加速空洞の製造実態 <米国>

【空洞の生産状況】

「高電界（達成）成功率」（High Gradient Yield）は、ILC のコストドライバーとして単体で最も重要な要素であり、2005 年に目標として歩留り率 90%、平均加速勾配 35MV/m が設定された。これに取組んだグループは、ANL、Cornell、DESY、FNAL、KEK、そして JLab である。当初フォーカスされた技術は、繰返し電解研磨 (Repeatable electropolishing) であり、クリーニングとハンドリングの信頼性確保がテーマであった。その後、各グループの活動は、電解研磨による表面加工のみならず、加速空洞の製造自体に拡大した。

これらの取組みの進捗は、専用に構築されたデータベースによって管理され、ILC の TDR が完成するまでに、134 台の加速空洞のデータが含まれることとなった。

JLab では、約 60 台の 9 セル空洞が専用に用意され、120 回の電解研磨サイクルと、200 回の低温での縦測定が実施された。空洞を製作した企業は AES 社と Niowave/Roark 社であり、組立（アSEMBル）と計測を実施したのは JLab、FNAL などである。なお、最近の 7 セルの CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility) アップグレード空洞は、中国 OSTEC 社が製作に参加することとなった。

JLab での取組みには、KEK から若い研究者も参加するなど、将来に向けた国際的な枠組みでの研究が進められている。

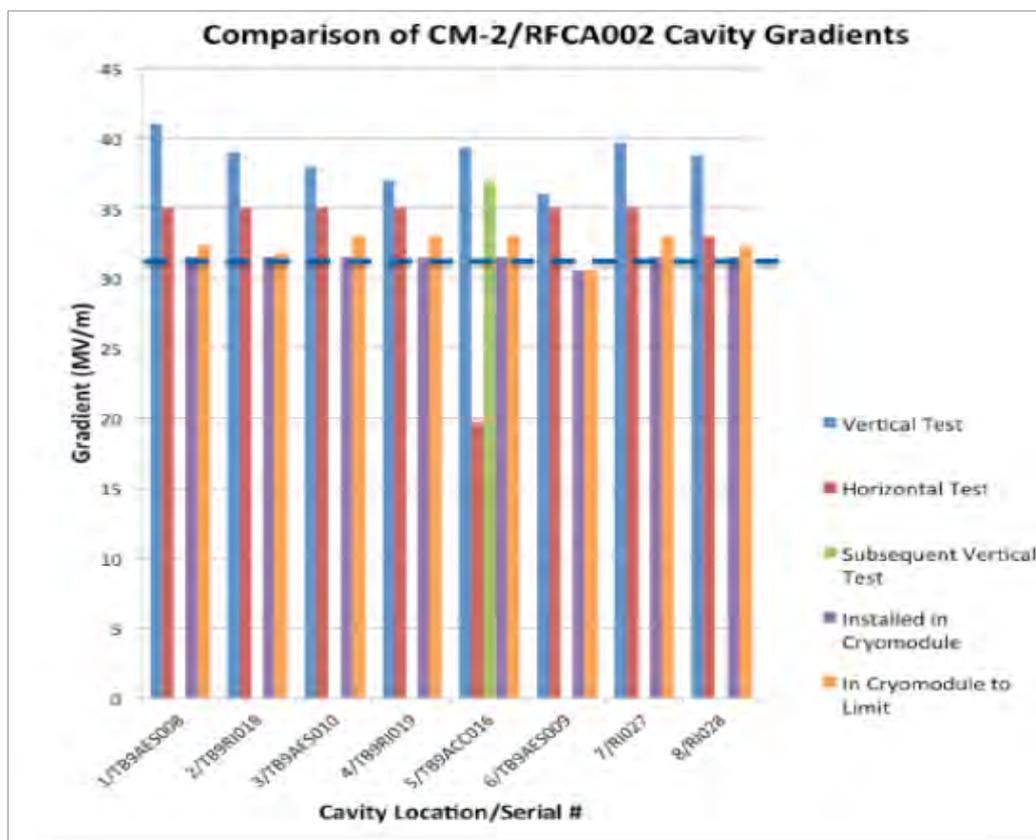
【空洞の性能試験結果】

JLab が行なった空洞単体の縦測定では、各社で製作された TESLA 形状の fine-grain ニオブ加速空洞は、TDR の求める Q 値 (8×10^9) と平均加速勾配 35MV/m を達成した。このため、JLab は、性能が確認された 8 台の加速空洞を FNAL のクライオモジュールに組み込むために出荷した。これらの空洞は FNAL で実施された縦測定及び、クライオモジュールに組み込んだ後の測定でも平均加速勾配 32.2MV/m を達成した。

ILC が求める縦測定での平均加速勾配 35MV/m には、高圧洗浄や電解研磨の再実施といった 2 回目の再処理が許容されることとなり、さらに $35\text{MV/m} \pm 20\%$ の許容範囲が設定されることになった。当初の ILC では初期加工、初期表面処理のみで 20% 程度の許容できない性能の空洞が出ることを想定していたが、これらの取組みを通じて 2 回目の表面処理による性能改善効果が示された。

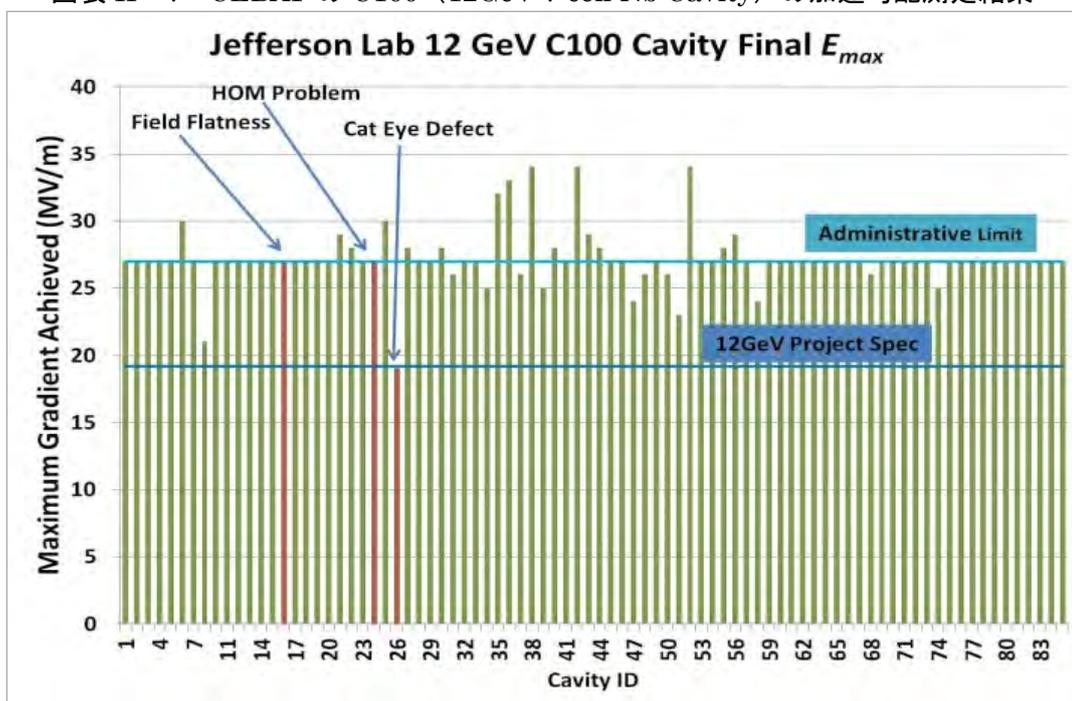
CEBAF の 12GeV のアップグレードプロジェクトは既に終了し、80 台の新しい 7 cell 低ロス形状加速空洞が完成した。その結果、この形状が ILC 空洞の候補形状となりえることが証明された。

図表 II-6 FNAL におけ空洞及びクライオモジュールの加速勾配測定結果



(出典) JLab 訪問ヒアリング時配布資料

図表 II-7 CEBAF の C100 (12GeV 7-cell Nb Cavity) の加速勾配測定結果



(出典) JLab 訪問ヒアリング時配布資料

c) ILC 用超伝導加速空洞の製造実態 <日本>

【空洞の生産状況】

三菱重工は、1.3GHz の Tesla-like 超伝導加速空洞と E-XFEL 仕様の Tesla 超伝導加速空洞の製造が可能である。E-XFEL のレシピによってつくられる ILC 向けの STF 空洞 (KEK 向け) 34 台を生産した実績を持っている。

【空洞の性能試験結果】

上記の STF 空洞の中で、近年製造した空洞 (12 番目~26 番目) については、平均加速勾配 35.2MV/m を達成している。製造を始めた当初は性能がばらついていて、実績を重ねる間に安定した。しかし、27 番目~30 番目の空洞については、初めて「4 本同時電子ビーム溶接 (EBW)」が可能な真空チェンバーを使ったことにより、空洞の性能にバラつきが出ている。なお、さらに経験値が上がれば、35MV/m の平均を達成できる見込みである。

同社で開発した 4 本同時 EBW 機器は、真空容器を閉じて真空状態にした後、自動運転で 4 本の空洞を溶接することができるため時間の短縮になる。真空を破らずに 4 本一気に溶接することができるので、真空引きの工程と熱を冷ます時間が短縮されるため、空洞一本あたりの製造時間の短縮が可能である。

図表 II-8 STF 向け超伝導加速空洞の加速勾配測定結果

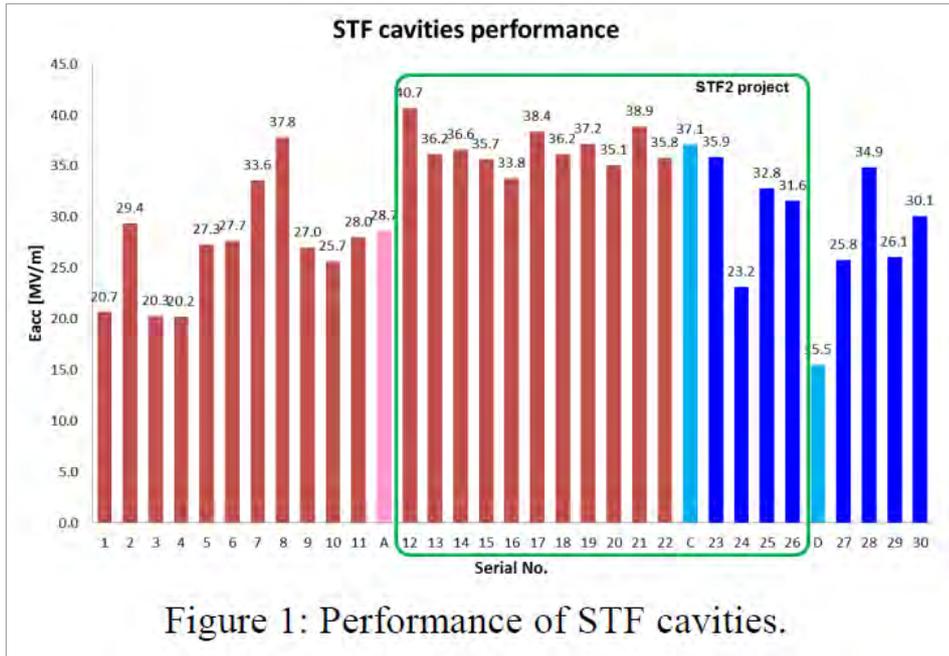
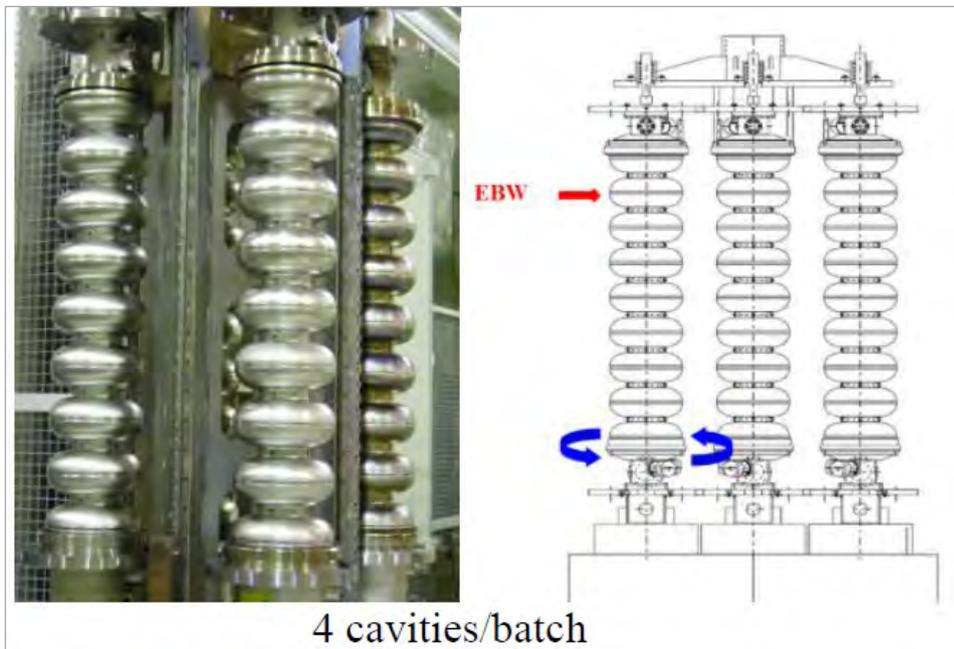


Figure 1: Performance of STF cavities.

(出典) 三菱重工訪問ヒアリング時入手資料

図表 II-9 4本同時電子ビーム溶接 (EBW) 設備の写真及び図



(出典) 三菱重工訪問ヒアリング時入手資料

<参考> 超伝導加速空洞製造の技術体系

技術	概要
■空洞製造	9連超伝導加速空洞を製造するための加工、溶接技術
電子ビーム溶解	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ Torrの真空中において電子線によりNb(ニオブ)を溶解し不純物を取り除き純度を高める。
圧延・焼純	不純物の混入がないようにクリーンルームにおいてニオブインゴットを圧延と焼純を繰り返し、厚さ2.8mmの板に加工する。
焼純	圧延を繰り返した材料は、層状の構造が残り機械的な応力歪が蓄積されているため、720℃、2時間、 10^{-5} Torrで焼純を行う。
深絞り加工	厚さ2.8mm、直径270mm、中心部に30mmφの穴加工をした後深絞りによりカップに加工される。
トリム加工	深絞り後、カップの両端に残っている空洞製作に不要な部分を取り除く。
電子ビーム溶接	大気中で溶接すると溶接部に酸素等不純物が混入すると超伝導性能が低下するため、真空中で電子ビームによって溶接する。溶接終了後も部品が100℃以下に自然冷却するまで待つ。
■検査・試験	製造された9連超伝導加速空洞の性能を発揮させるためのチューニング、内面検査、性能試験のための技術
チューニング	3次元計測により加工寸法を測定し、必要に応じて機械的に調整する。
Pre-tuning	ビードプル法により各セルのπモード共振周波数を測定。測定しながら塑性変形により電場の強度を98%までそろえる。
内面検査	空洞の内面状態を詳細に検査し、性能との因果関係を探り製造条件にフィードバック
性能試験	空洞性能と内面状態との因果関係を把握し、製造や表面処理条件にフィードバック
■表面処理	フィールドエミッションによる暗電流増加やクエンチによる超伝導状態の破れを抑制するために空洞内面を滑らかかつ正常に保つための処理技術
遠心パレル研磨(CBP)	水と石による機械研磨。ニオブ材料の欠損除去、溶接部分の平坦化のため
化学研磨(CP)	化学反応、エッチング。機械研磨の汚れ除去、EP前にある程度スムーズな表面を準備のため
焼純	750℃で3時間真空炉で燃焼。機械研磨などで蓄積されたストレスの解放、水素ガスの脱ガスのため
電解研磨(EP)	化学反応と電気反応を用いた研磨。非常にスムーズな表面を作るため
高圧洗浄(HPR)	超純水(UPW)による高圧洗浄。表面の異物除去、清浄化のため
ベーキング	120℃で45時間、空洞内を真空排気。酸素の拡散のため

(出典) 各種資料をもとに作成

(3) 超伝導加速空洞の評価と技術的課題

① ILC 用空洞の加速勾配目標達成の可能性と課題<DESY>

E-XFEL では、納品された空洞の縦測定の結果 20MV/m 以下となった空洞については DESY で再処理している。多くの場合、高圧洗浄 (HPR) 処理を行うことで性能要求を満たすことが可能となっている。

ILC では、同様の再処理を 28MV/m 以下で行う予定となっている。その場合、企業の生産する空洞の性能が上がらない限り ILC の場合、再処理する空洞の数は E-XFEL と比較して多くなると予想される (TDR のコスト評価では空洞生産のうち 10%分は性能達成が見込めないものとして、余剰分を仮定している)。

E-XFEL で得られた経験をもとに、ILC の場合のシミュレーションを行うと、再処理 2 回の後に得られる空洞の平均加速勾配は usable gradient で評価した場合 34MV/m となり、歩留り率は 82%となる。これは ILC の要求水準 35MV/m と歩留り率 90%を下回る数値である。

しかし、再処理 3 回目を行うとすると、平均加速勾配 (usable gradient で評価) 34MV/m と歩留り率 94%となり、ILC スペックを満たすことができる数字となる。

なお、TDR では縦測定の回数は空洞 1 個につき平均 1.25 回と仮定されている。再処理を 3 回行うと、平均 1.5 回となりコスト増につながる。

図表 II-10 ILC 用空洞の加速勾配目標達成の可能性推定 (モンテカルロモデル)

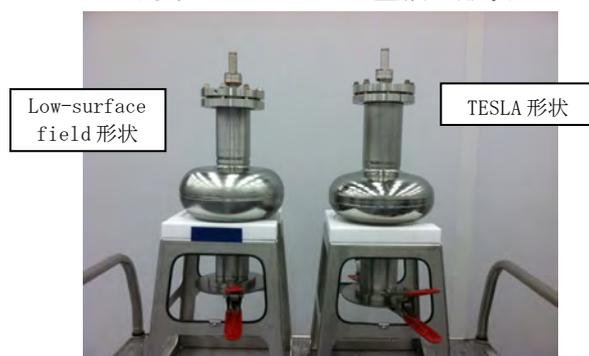
		ILC TDR (assumed)	XFEL max	XFEL usable
First-pass	Yield >28 MV/m	75%	85%	66%
	Average >28 MV/m	35 MV/m	34 MV/m	34 MV/m
First+Second pass	Yield >28 MV/m	90%	95%	82%
	Average >28 MV/m	35 MV/m	36 MV/m	34 MV/m
* based on retreatment model fit from XFEL data				
First+Second+third pass	Yield >28 MV/m	-	95%	94%
	Average >28 MV/m	-	36 MV/m	34 MV/m
Average VT per cavity (TDR assumed 1.25):				
1 st pass ("as received")	1			
1 st + 2 nd pass	1.4			
1 st +2 nd +3 rd pass	1.5			
			retreatment predominantly High-Pressure rinse (HPR)	
			TDR assumed surface re-polish (EP)	

(出典) DESY 訪問ヒアリング時入手資料

②High efficiency high gradient (HEHG) SRF 開発に向けた課題 (JLab/FNAL)

TDR を満たす形状の開発について課題はないとされているが、High efficiency high gradient (HEHG) SRF 空洞の開発に向けて、形状 (TESLA 形状、Low-Loss/ICHIRO 形状、Re-entrant 形状、Low-surface field 形状)、素材(Large-Grain/Medium-Grain, インゴットニオブ)、表面処理 (電解研磨, 再高圧洗浄, 再電解研磨) それぞれの面で検討が進められている。これらを組合せ、高い加速勾配と優れた Q 値を低コストで達成することが課題となっている。

写真 : HEHG SRF 空洞の形状



(出典) JLab 訪問ヒアリング時配付資料

JLab で注目している形状は、次図表一番右の LSF であり、緑で書かれた 3 つを特徴としている。LSF は、ICHIRO モデルの経験を活かして検討が進められているものであり、KEK の ICHIRO モデルは、40MV/m を達成している。これは、KEK にて加工が施され JLab に送付されてきたもので、単セル加速空洞における計測では 50MV/m 以上を達成している。

図表 II-11 加速空洞の形状の違いによる性能比較

		TESLA	Low-loss/ICHIRO	Re-entrant	Low-surface-field
frequency	MHz	1300	1300	1300	1300
Aperture	mm	70	60	60	60
Epk/Eacc	-	1.98	2.36	2.28	1.98
Hpk/Eacc	mT/(MV/m)	4.15	3.61	3.54	3.71
Cell-cell coupling	%	1.90	1.52	1.57	1.27
G*R/Q	Ω^2	30840	37970	41208	36995

Z. Li, C. Adolphsen, A New SRF Cavity Shape with Minimized Surface Electric and Magnetic Fields for the ILC, LINAC08 (2008).
R.L Geng et al., Development of Ultra High Gradient and High Q0 Superconducting Radio Frequency Cavities, IPAC13 (2013).

- 50 MV/m capable due to lowered Hpk/Eacc
- 20% more efficient as compared to TESLA shape
- Lowered risk in field emission by keeping Epk/Eacc the same as TESLA shape

(出典) JLab 訪問ヒアリング時配付資料

③超伝導加速空洞の性能向上に向けた技術開発上の課題

超伝導加速空洞の性能向上や工業化に向けた技術面での課題として、以下の点が指摘されている。

■低コストで効率的な空洞表面処理方法の開発<三菱重工、KEK>

低コストの電解研磨液が使用可能なパルス電流電解研磨技術、アルカリ電解研磨技術の開発（野村鍍金開発中）が有効である。また、縦型電解研磨装置の開発も重要である。空洞製造工程のほとんどが鉛直方向に立てた状態での作業になるため、電解研磨装置も縦型処理が可能になると作業効率が向上すると考えられる。

■低コストで大量処理が可能な電子ビーム溶接方法の開発<三菱重工>

電子ビーム溶接の真空チェンバーの真空引きに時間を要するため、一回の真空引き（一バッチ）の間に、複数本の加速空洞を連続で電子ビーム溶接が可能な装置開発が必要である。三菱重工では、空洞4本を一バッチで溶接できる自動化装置を実証済である。

■空洞の内面検査装置の開発<三菱重工>

空洞の検査・補修に先駆け、欠陥場所、特にクエンチ位置を特定するため装置（空洞表面温度分布計測装置、放射線計測装置、音響放射計測装置など）の開発が求められる。

■低コストで効率的な空洞縦測定装置の開発<KEK、三菱重工>

低コストの空洞縦測定方法や、複数の空洞を同時に冷却・電界計測が可能な縦測定装置の開発が必要である。

■低コスト・安定性に優れたチューナーの開発<KEK、三菱重工>

■グレイン（粒界）サイズを最適化したインゴットニオブ材の開発<KEK>

④超伝導加速空洞の量産化の可能性

■空洞量産化の前提：

ILCで必要とされる超伝導加速空洞 18,000 台を、日米欧 3 極で分担して 6 年間で生産すると仮定すると、年間 1 極当たり 1,000 台となる。

上記の量産化に向けた日米欧の企業における対応の可能性については、以下のとおりである。

【欧州：Zanon 社の可能性】

年間 400 台の空洞を製造するには、E-XFEL 空洞に比較して製造ペースを 2 倍にしなければならない。E-XFEL 空洞を製造するために整えた Zanon の生産スキーム

は、様々な工夫を重ね年間 200 台で最適化 (optimization) されている。このスキームや品質管理のコンセプトを変えないで対応するとしたなら、単純に今ある生産インフラと同じものをつくる (生産インフラを 2 倍にする) ことで対応可能である (生産能力拡大は、1.5~2 年で可能)。ただし、単純に施設や設備、人員を 2 倍にするという意味ではない。実際は、現施設に余力があるため、1.6~1.7 倍程度の拡張で済む。

【欧州：RI 社の可能性】

ILC 用空洞の必要生産量を、1 社当たり年間平均 500 台 (6 年間) と仮定する。もし RI 社が、労働形態を 2 シフトから 3 シフトへ、週 5 日労働から 7 日労働に条件を変えたなら、大きな生産インフラの追加投資をせずに、多少のイノベーションと設備拡大や 20% 程度の新人採用のもとで、この生産目標量は達成できる。これは原則技術の確立した E-XFEL 用空洞を使い、単純に量の拡大だけを考えればよいからである。

【米国：AES 社の可能性】

同社は、受注生産による放射線源及び加速器メーカーで、1998 年以来、122 の超伝導加速空洞を製作、ニオブを使用した 32 の加速空洞を製作してきた。

ILC 用加速空洞の製作は、技術・ノウハウとしては量を含めて可能と考えているが、E-XFEL 方式で国が生産拠点を設置すべきで、7 年間の生産期間のみで民間企業単体での設備投資は難しいとの意見を持つ。

【米国：ROARK 社の可能性】

同社は、受注生産による航空機及び軍需用部品メーカーで、FNAL 向けに 3.9GHz TESLA シングルセル加速空洞 1 台、1.3GHz TESLA シングルセル加速空洞 1 台、1.3GHz TESLA 9 セル加速空洞 1 台、SSR1 Single Spoke Resonator 1 台を納品済みである。

ILC 用の空洞生産については、国や研究機関が設備投資を担った生産インフラがあれば、1 極につき 7 年間で 6,000 台の空洞の生産は可能であるが、その場合現状の 4~5 倍の生産スピードが必要となり、特に電子ビーム溶接など時間を要する作業での時間短縮が不可欠と考えられる。

【日本：三菱重工の可能性】

これまでの空洞製造の経験から、電子ビーム溶接機の増設と溶接チャンバーの真空引き一回の間に連続的に 4 空洞を溶接する技術の適用により、年間 500 本程度の空洞製造が可能と思われる。

また、空洞に取り付ける部品点数の削減、材料変更、電子ビーム溶接から一部レーザー溶接や TIG 溶接へ変更することにより、空洞製造時間を短縮しコストを削減できると思われる、ILC 着工前の検証が望まれる。

⑤超伝導加速空洞の性能向上と量産化に向けた製造工程の課題

超伝導加速空洞の性能向上と量産化に向けた製造工程での課題として、ヒアリング及びアンケート調査によれば、以下の点が指摘されている。

■空洞製造の最終工程で電解研磨（EP）を行なうこと<DESY、Zanon 社>

DESY は、最終工程の表面処理における電解研磨が化学研磨に比較して、空洞の性能を出すという点で一番よい方法と認識している。実際、E-XFEL 用の加速空洞を電解研磨と化学研磨の両方式で 400 台ずつ製作した結果、電解研磨のほうが化学研磨の場合よりも平均 3MV/m 性能が上がるのが統計的に判明した。また、企業側も空洞の最終表面処理の方法を化学研磨から電解研磨に変更すれば、ILC の要求水準 31.5MV/m を出せる空洞ができる確率があがるのは間違いないと認識している。

■電解研磨後の洗浄にエタノール使用をやめること<KEK>

電解研磨すると必ず硫黄が空洞内面に付着し、硫黄が空洞の性能を低下させる原因となる。DESY では電解研磨を行った後に、エタノールで洗っているが硫黄はエタノールでは取りにくい。日本や米国は、エタノールの使用は止めて界面活性剤（洗剤）をつかっている。それによって硫黄はほぼ除去できると考えられる。

■クリーンルーム及び作業を改善すること<Zanon 社、DESY>

企業の認識では、空洞製造工程の生産性は、クリーンルーム設備の性能向上及び規模を増大することによって高めることができる。また、空洞の量産に適したサイズの特注クリーンルームの可用性（availability）の向上、訓練され、熟練したクリーンルームオペレータの確保が重要である。さらに、作業者の頭部が空洞よりも上にある状態で作業するなどの不適切な作業を訓練等によって少なくすることが重要である。

■空洞に高圧洗浄（HPR）を行なうこと<DESY、KEK>

DESY（E-XFEL）では、試験の結果 20MV/m 以下の空洞を再処理している。ほとんど場合、高圧洗浄を行うことで性能要求を満たすことが可能となった。これは電界放出（FE）を引き起こす微粒子が空洞の中に入りこんでいたことを示す。

■空洞の電子ビーム溶接の質や効率を高めること<KEK、Zanon 社、三菱重工>

空洞の性能低下の原因として、電子ビーム溶接が不完全でニオブとニオブがきれいに溶けない場合あるいは溶接面に不純物質が存在する場合、ところどころにボイドができ、それが表面処理により表面に現れるとクエンチを起こすことが挙げられる。このため、電子ビーム溶接の質の向上が重要である。

■空洞製造ラインの一部自動化を行なうこと<Zanon 社、KEK>

自動化可能な空洞の製造工程は、深絞り、成形、及び一部の機械加工工程である。これらの操業は、関連する分野の企業に委託可能である。また、空洞運転の各種自動化ソフトウェアの開発も必要である。

なお、超伝導加速空洞の量産化の課題と実現可能性についての研究機関・企業へのアンケート回答結果を示すと、次図表のとおりである。

図表 II-12 超伝導加速空洞の量産化の課題と実現可能性（アンケート結果）

項目	内容
<p>■空洞量産化の課題</p>	<p>【DESY】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・E-XFEL での経験に基づき、クライオモジュールの連続生産に関する根本的な障害は想定していない。既に指摘した通り、既存の試験・再処理インフラの能力は、人員増強によってモジュール 1.5 個/週（空洞 10～15 個/週）まで押し上げることは原理的に可能である。より高い生産速度が必要な場合、追加インフラの建設（並びに操業するための追加人員）が必要となる。インフラを単純に倍増した場合、週当たり約 3 個のモジュールを製作することができる。そのような高い生産速度については、人員に関する他のモデル（例えば民間企業の労働力を利用）を考慮する必要があるかもしれない。 ・E-XFEL の製造方法及び仕様に基づいて DESY は以前に産業調査を何件か委託したことがあり、それらの調査は、現在よりはるかに高い生産速度（最大でモジュール 10 個/週）が可能であることを示した。ただし、試験については常に完成モジュールの 3 個に 1 個の試験と仮定している。 ・ここでも、現在の ILC 勾配仕様は、E-XFEL で達成されている平均値を約 10%上回っている（これは、E-XFEL のモジュール生産終了時に見直されるはずである）。低性能空洞の表面再処理及び再試験能力を増強することによって ILC の加速勾配は達成できる可能性が高まるが、追加コストが発生する。また、モジュール組立て時に見られる性能低下は依然として対処する必要がある。 <p>【Zanon 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・量産に適したサイズの特注クリーンルームの可用性。訓練され、熟練したクリーンルームオペレータの確保。 ・低コスト、高スループットの電子ビーム溶接方法の開発（それほど重要ではない）。同等の迅速かつ適切なサブアセンブリの準備ライン（化学及びプリアセンブリ）によってサポートされていない限り、高スループットの電子ビーム溶接設備は役に立たない。

	<p>【AES 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ILC を実現する上で、技術的な問題があるとは認識していない。 ・ 同社は高品質の空洞を安定的に製造する能力を持っているものの、今後の課題は、ILC 向けの生産レートにスケールアップし、業界で培った経験を活用して熟練技術者を育成し、訓練することである。 <p>【JLAB】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ シートメタル成形、機械加工、電子ビーム溶接、及び電解研磨の既存の生産法は、ILC の性能要件に適合することが実証された。大規模生産におけるコスト削減は、学習曲線、自動化、バルク調達等を通じてある程度達成可能である。より大きなコスト削減を達成するためには、代替の方法、材料、及びプロセスを探索すべきである。すぐにでも実施する事項であり、プロジェクトの建設が始まると、大幅な変更をする時間はなくなる。 ・ JLab の SRF 生産体制は 1 日 1 シフト、週 5 日間操業する。シフトを増やせばスループットを増加できる。2K ヘリウムの供給能力増強及び試験用トンネルの追加設置に戦略的な投資がなされれば、試験能力を倍増することができる。空洞メーカーがより上流のプロセス（例えば、電解研磨、高圧洗浄、組立等）を担当しつつあるため、ハブ研究所では試験能力はそれほどの制約にはならない。 ・ ただし、ハブ研究所では再加工又は修理のために 10~20%レベルの能力を維持する必要がある。JLab のアップグレードに関する経験では、初回の試験で不合格となった空洞の大半は高圧洗浄を再実施するだけで 2 回目の試験に合格した。一部の空洞は、合格するために軽度の高圧洗浄を必要とするかもしれない。一方で、不合格の空洞を合格させる目的でこれ以上の労力をかけるのは非経済的とも考えられる。 <p>【三菱重工】</p> <ol style="list-style-type: none"> (1)低コストなクライオモジュール・空洞の設計の検証・確認 <ul style="list-style-type: none"> ・ E-XFEL の 20 年前の設計は、現時点の技術では必ずしも低コストと言えないため見直しが必要。 (2)低コストで効率的な空洞表面処理方法の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 低コストの電解研磨液が使用可能なパルス電流電解研磨技術、アルカリ電解研磨技術、縦型電解研磨装置等の開発 (3)低コスト・安定性に優れたチューナーの開発 (4)低コストで大量処理が可能な電子ビーム溶接方法の開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 一回の真空引きの間に、複数本の加速空洞を連続で電子ビーム溶接が可能な装置の開発 (5)空洞の内面検査装置、電子ビーム溶接ビードの局所研磨装置開発 <ul style="list-style-type: none"> ・ 内面検査装置は、量産に向けて貸与が望ましい
--	---

	<ul style="list-style-type: none"> ・欠陥場所、特にクエンチ位置を特定するため装置(空洞表面温度分布計測装置、放射線計測装置、音響放射計測装置など)の開発 (6)低コストで効率的な空洞縦測定装置の開発 ・複数の空洞を同時に冷却・電界計測が可能な縦測定装置が必要 (7)その他装置の自動化 ・周波数プリチューニング装置の自動化
<p>■量産化手法のメニュー</p>	<p>【DESY】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モジュール生産が 1.5 個/週を超える場合、E-XFEL 向けに使用されているインフラに加えて追加のインフラが必要となる。完全な 3 交替作業が必要となる可能性があるが、必須ではないかもしれない：これは要求される生産速度に依存する。しかし、重大な問題は見当たらない。 ・DESY の ILC 向け研究で実証されたように、非常に高い生産速度を達成するためには専用のインフラが必要となり、産業への依存度が高くなる可能性が高い。 <p>【Zanon 社】</p> <p>(1) 製造ラインの自動化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自動化可能な製造工程は、深絞り、成形、及び一部の機械加工工程である。操業は、関連する市場分野の企業に委託可能である。上記（サブコンポーネント製造者の認定）は非常に迅速に行うことができる。 <p>(2) 製造設備のアップグレードと大型化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・製造工程の生産性は、クリーンルーム設備の性能向上及び規模を増大することによって高めることができる。 <p>(3) 製造人員の交替システムの採用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・E-XFEL 向けの生産は 2 交替で実施していた。ILC 向けの量産も同様に 2 交替で実施できるはずである。 <p>【AES 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・当社の現在の施設とスタッフで、年間約 50 個の空洞を製造可能である。2007 年から 2011 年にかけて、フェルミ研究所の委託で ILC の生産レークの要件に関する調査を数件実施した。 ・これらの調査の結果から、必要な空洞全数を生産し、クライオモジュールを組立てる施設の要件を明確にした。このモデルは、パリの E-XFEL 向けクライオモジュールの生産に使用されているモデルに似ている。E-XFEL では研究所が施設を設置し、企業または協力機関が運用を行っている。 <p>【FNAL】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・有効なコスト削減手段を早急に調査する必要がある。これには 3 セル又

	<p>は 9 セルのハイドロフォーミングとスピニングを含む。Nb のコストと Nb の量を削減するため、爆着結合した Nb-Cu を検討すべきである。高性能空洞（単セル及び一部マルチセル）に関する原理の証明は既に実証済みである。インゴット Nb（インゴットから直接スライスしたシート）によるコスト改善及び Q 値改善を追究すべきである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ただし、これらの調査には資金が必要である。DESY は、インゴット Nb 技術を応用した空洞で非常に高い性能（約 45 MV/m）を達成した。 <p>【三菱重工】</p> <p>(1)製造ラインの自動化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・製造工程のうち、ダンベル、エンドグループの一体 EBW は可能 ・外観検査、周波数検査の自動化。 <p>(2)製造設備の高度化・大型化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ILC 向けに表面処理レシピ・装置の最適化 等 <p>(3)生産労働力のシフト制の導入</p> <ul style="list-style-type: none"> ・製造工程は、2あるいは3シフトにより生産量を増強できるが、作業工程、製造装置配置、作業員の複数作業掛け持ち等の全体最適化が必要
<p>■量産化手法の技術的な実現可能性・実現時期</p>	<p>【DESY】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ E-XFEL のインフラは、理論的には E-XFEL モジュールの試験の完了（2016 年半ば）後に利用可能となるが、他のプロジェクトも現在検討されている（E-XFEL 及び FLASH の CW<Continuous Wave : 連続波>動作に向けた研究開発、予備の E-XFEL モジュールと修理、ESS の中間ベータ空洞試験など）。完全なインフラが E-XFEL（及び他の直近プロジェクト）以降も維持されるかどうかはニーズによる。ILC が大幅に遅れた場合、DESY のインフラが存在することは保証できず、追加コストをかけて再構築しなければならない可能性が高い。しかし、ILC の生産量では、インフラのコストは支配的要因にはならない可能性が高いことを指摘しておく。 <p>【Zanon 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ILC 向け量産は、当然ながら製造業者数社で分担すれば対応可能である。 ・ ILC 向け空洞の数量と生産スケジュールにより、下請業者の利用（可能であれば「標準」工程の委託）を増やし、外注できない工程（EBW、表面処理、クリーンルーム工程）の生産能力を増強することによって要求に対応する。 ・設備アップグレードのフィージビリティは、当社の生産量が決定してから 2 年以内

	<p>【三菱重工】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ILC 計画の要求性能、コスト、生産量が実現できるかは、ILC 建設の前に量産技術が確認できる数百台規模の加速器建設プロジェクトが必要 <p>(1)製造ラインの自動化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 電子ビーム溶接における4空洞バッチ処理装置を実証済 <p>(2)製造設備の高度化・大型化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ILC向けに表面処理レシピ・装置(縦型EPなど)の最適化については、国内の研究機関で検討をお願いしたい <p>(3)生産労働力のシフト制の導入</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 生産シミュレーションなどの手法を活用し、最適な作業工程、製造装置配置、作業員の作業分析を実施し、量産ラインを設置する必要あり
<p>■量産化手法の経済的な実現可能性</p>	<p>【DESY】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 101 個の E-XFEL モジュールを週 1 個以上の速度で製作・試験する技術的な実現可能性が明確に実証された。E-XFEL モジュール 1 個の総コストは、約 1.5 MEUR (百万ユーロ) プラス試験コスト 0.2 MEUR である。ILC のような高生産速度に関する DESY の調査では、専用設備の自動化に投資することによってこれらのコストを削減できることを示した。最初の生産量増強後、検査率を 100%から (例えば) 33%まで減らすことによって試験コストを低減することが可能である。

⑥超伝導加速空洞を日本で集約・結合する場合の課題

ILC 計画への参加各国で製造された超伝導加速空洞を各国から日本へ輸送し、日本で集約・結合 (組立) する場合の問題 (イシュー) として、以下の点が指摘されている。

A : 場所・輸送の問題 (イシュー)

図表 II-13 超伝導加速空洞の場所・輸送に係る問題 (イシュー)

項目	問題 (イシュー)
<p>■空洞輸送の問題 (イシュー)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空洞本体の輸送に関しては問題ないを考える。最も安全で速い輸送方法は航空貨物である。E-XFEL 向けの出荷 (陸路) では何も問題は起きなかった。<RI 社> ・ 空洞の輸送 (海上輸送または航空輸送) は、適切な梱包システムが使用されていれば、性能が低下することはない。<Zanon 社>
<p>■税・輸送コストの問題 (イシュー)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 管理上の課題は、輸出入税のコストを最適化することである。コスト、物流、及び時間の問題。航空輸送は、輸送時間の問題を解決するが、コストを増加させる。<Zanon 社>

B：性能・品質の問題（イシュー）

図表 II-14 超伝導加速空洞の性能・品質に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
<p>■長期的な性能低下の問題（イシュー）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・空洞性能の長期的な性能低下は予想していない。<RI 社> ・適切な設備と良好なメンテナンスを行えば、性能が低下することはないはずである。これは基本的に、製造工程及び完成した空洞の保管に当てはまる。製造中の重要な要因（critical factor）は、作業者の作業（クリーンルーム作業）の継続的な信頼性であるかもしれない。性能低下を防止するため、製造中の化学製品の劣化やフィルターの寿命を管理・監視する必要がある。<Zanon 社>

C：規制・管理の問題（イシュー）

図表 II-15 超伝導加速空洞の規制・管理に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
<p>■安全規則・要件</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・欧州圧力容器設備の安全規則と矛盾する安全規則があるとは認識していない。<RI 社> ・現時点では判断できないが、欧州で「安全」であれば日本でも「安全」であるはずである。可能であれば、該当する安全要件を複数国生産に対応して調整すべきである。<Zanon 社>

⑦超伝導加速空洞のコスト削減に向けた課題と方策

超伝導加速空洞について、小型化や高性能化の点で、代替可能性のある技術/製造品として、次が挙げられている（アンケート結果より）。

項目	概略
<p>■代替技術</p>	<p>(1) 一体成形型の超伝導加速空洞</p> <p>(2) 高温超伝導材料薄膜型の超伝導加速空洞</p>
<p>■技術開発の主体</p>	<p>(1) DESY(独)、MHI(三菱重工、日本)</p> <p>(2) Cornell 大(米) 他</p>
<p>■技術開発の内容・実証状況について</p>	<p>(1) DESY : Nb チューブをフローフォーミングで製造、それをハイドロフォーミングで 3 連空洞を一体成形し、それら 3 個を電子ビーム溶接で連結して 9 連化。3 本の 9 連空洞が製造され 27MV/m~35MV/m を達成。9 連一体成形は未実施</p> <p>MHI : 深絞りで製造した Nb チューブをスピニング加工により一空洞分製造し、ハーフセルを両側から電子ビーム溶接して 2 連空洞を製作。JLab の協力を得て表面処理、加速電界評価を実施し、32.4MV/m を達成</p>

	(2)Cornell大:Nb単空洞へNb3Snをコーティング、温度4.2Kで17MV/mを達成
■技術の実用化に向けた課題について	(1)DESY：電子ビーム溶接を用いた製造方法と比較したコスト再評価 (2000年の評価では一体成形が10~15%コスト高) MHI：多連空洞のスピニング加工技術開発 (2)Cornell大：他空洞化技術開発
■技術の実用化までの期間について	(1)DESY：製造設備の建設・実証、MHI：未定 (2)Cornell大：未定
■技術の実用化までのコスト	(1)、(2)とも現状未評価

(出典) 三菱重工アンケート結果より

3) クライオモジュール

(1) TDR (技術設計報告書) ベースラインに示される技術の概要

ILC のメインライナックは、ほぼすべてが 2 種類 (タイプ A、B) の標準対応タイプの ILC クライオモジュール (共に 12.65m 長) から構成されている。タイプ A は 9 台の 1.3GHz の 9 セル空洞からなり、タイプ B は 8 台の 9 セル空洞に加えてモジュールの中央に配置されている 1 つの超伝導四極磁石パッケージからなる。

クライオモジュール設計は、TTF2/FLASH 加速器用に DESY で開発及び使用されているタイプ 3 バージョンを改良したものである。この新設計は E-XFEL 用に、産業界によって現在製造されている 100 のクライオモジュールでも採用されている。

クライオモジュールの最も重要な部分は空洞パッケージである。これは、ヘリウム供給パイプ、高出力基本モード RF カプラー、機械式チューナー及び磁気シールドを装着したチタン合金ヘリウムタンクの中にある 9 セル空洞から成る統合システムである。

写真：超伝導高周波クライオモジュール

左：DESY の FLASH 施設に設置されているタイプ III モジュール

右：ILC タイプ IV モジュール



(出典) TDR

(2) ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善及び最新開発・製造実態

① ILC の PR (進捗報告書) に示される技術改善

< 5.1 SRF 加速空洞及びクライオモジュールの設計と組込み >

E-XFEL プロジェクトにおける多連空洞組立の経験を踏まえて、加速空洞のヘリウム格納容器内に磁気シールドを設置することが決定された。これにより性能の信頼性が高まり、組立作業が一層容易になることでコスト節約が期待される。内部磁気シールドの効果は、様々な実験や解析で確認されている。

<8. クライオモジュール製造を担う中核研究所の規模>

a) 世界3ハブによるクライオモジュール生産体制構築

ILC 用クライオモジュールを完成させる中核研究所が全世界で少なくとも 3 つ設けられることが想定されている。各中核研究所の役割は以下ようになる。

- ・ ニオブ素材の受領と品質監査、及び加速空洞製造業者への輸送
- ・ 加速空洞製造のフォローアップ
- ・ 全ての加速空洞に対する冷却試験実施
- ・ カプラー製造のフォローアップ
- ・ カプラーの調整及びクライオモジュール組立業者への供給
- ・ クライオモジュール組立てのフォローアップ
- ・ 完成したクライオモジュールの試験：TDR では、38%（量産前に 5%、量産中に 33%）のクライオモジュールに対し冷却試験を行うことを想定している。
- ・ データベース及び生産全体に対する記録の管理
- ・ 設置可能なクライオモジュール完成品の梱包及び ILC サイトへの納入

次図表に、3 つの中核研究所を設けた場合の ILC 用クライオモジュールの製造ペースと、E-XFEL でのペース実績を要約して比較する。

図表 II-16 E-XFEL と ILC のクライオモジュール生産能力の比較

	E-XFEL	ILC
Number of hubs	1	3
Production duration (weeks)	125	325
Cavities/hub-lab	800	6000
Cryomodules/hub-lab	100	617
Cryomodule production/week	0.8	1.9
Cavity tests/week	6.4	18.5
Cryomodule tests/week	0.8	0.72*

- ・ Assuming 38% tested cold.

(出典) ILC の PR (進捗報告書)

<参考>

E-XFEL の製造フォローアップや試験 (DESY、CEA-Saclay、LAL-Orsay の合計) に要した人員について以下を参考とする。

DESY における加速空洞製造、及び加速空洞とクライオモジュールの試験には平均 56 名 (フルタイム当量/年) が必要であり、その他ポーランド (ポーランド科学アカデミー核物理研究所 (IFJ-PAN)) からの約 26 名の人員派遣を必要とする。CEA-Saclay におけるクライオモジュール組立てのフォローアップに約 12 名 (フルタイム当量/年)、加えて請負業者 34 名が必要である。なお、何か月にもわたる尽力を経て、2015 年 1 月以降クライオモジュールの生産及び組立ペースは 1.25 モジュール/週 (上述の通り、4 日でクライオモジュール 1 台) に達している点を強調しておく。これにより、ILC のクライオモジュール組立ペースは十分信頼性のあるものになると見込まれる。カプラーに関するフォローアップと調整 (RF コンディショニング) には約 6 名が必要である。

b) ILC 中核研究所における人員スタッフの確保

ILC の中核研究所の場合、週当たりの製造ペース向上のためには、特に加速空洞試験を中心に人員増が必要と考えられる。E-XFEL の経験から推定すると、ILC のホスト研究所への納入までに、中核研究所で SRF 加速空洞及びクライオモジュールの製造と認証作業を進めるために事務スタッフ（約 20%）も含めて 200~250 人/年（フルタイム当量）の人員が必要となる。

<10.2 SRF 技術>

c) クライオモジュールの性能の維持

E-XFEL におけるクライオモジュール認証プロセスの経験では、加速空洞のクライオモジュールへの組み込み後に加速空洞性能の多少の低下が認められた。クライオモジュールの性能低下を防ぐための詳しい研究が必要である。

<10.4 KEK の試験及び認証インフラ>

d) クライオモジュール認証インフラの整備

完成したクライオモジュール試作品を、ビーム加速を可能にするハイパワー RF 源を用いて試験するために、既存の試験ベンチを最優先に完成させる必要がある。KEK の新しい組立及び低温試験ホールでは、完成したクライオモジュールを組み込み、量産ペースの能力を実証するための加速空洞とクライオモジュール試験を実施する上で必要な全てのインフラを整える必要がある。

②最新開発・製造実態

a) E-XFEL プロジェクトにおけるクライオモジュールの製造

【クライオモジュールの生産状況】 <CEA-IRFU、ALSYOM 社>

E-XFEL 用クライオモジュール(12m×7 トン)の組立は、ALSYOM 社が CEA-IRFU (Saclay) からの委託で行っている。IRFU は、敷地内に工場を建設しスペースを ALSYOM 社に提供し、作業工程を管理している。

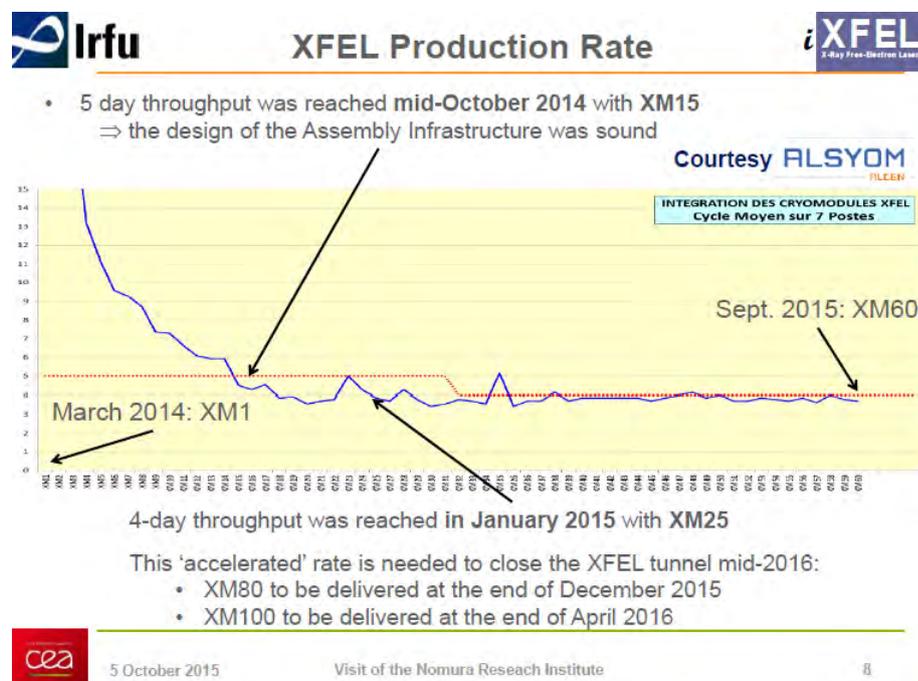
E-XFEL 向けのモジュールの製作総数は、合計で 101 台であり、65 番目のクライオモジュールを出荷完了。2015 年 10 月時点では、68 番目のモジュールの組立作業が進行中である。最後のモジュールは 2016 年 4 月に出荷予定である。モジュールの製作ペースは、4 日に 1 台または週 1 台のペースで DESY へ出荷されている。

クライオモジュールの組立（約 500 パーツから成る）は、以下の工程から構成される。

- ・クリーンルーム内における空洞と低温カプラーの組立及びアライメント
- ・ヘリウムチタンパイプ（ジャケット）溶接、チューナーシステム統合
コールドマスアセンブリ
- ・空洞のアライメント
- ・真空容器（クライオスタット）内の組立

- 高温ケーブル、圧送ライン組立
- 出荷前の最終試験と準備

図表 II-17 E-XFEL のクライオモジュールの組立速度（日数）



(出典) CEA-IRFU 訪問ヒアリング時入手資料

【クライオモジュールの性能試験結果】 <DESY>

DESY における E-XFEL クライオモジュールの納品試験は、当初はモジュールの不適合項目が多く、また検査工程自体にも問題があり検査に時間を要した。不適合項目のないモジュールについては、以前は 20 日間を検査に要していたが、現在は 10～12 日間で検査を完了し、平均 1.5 台/週の早さとなっている。

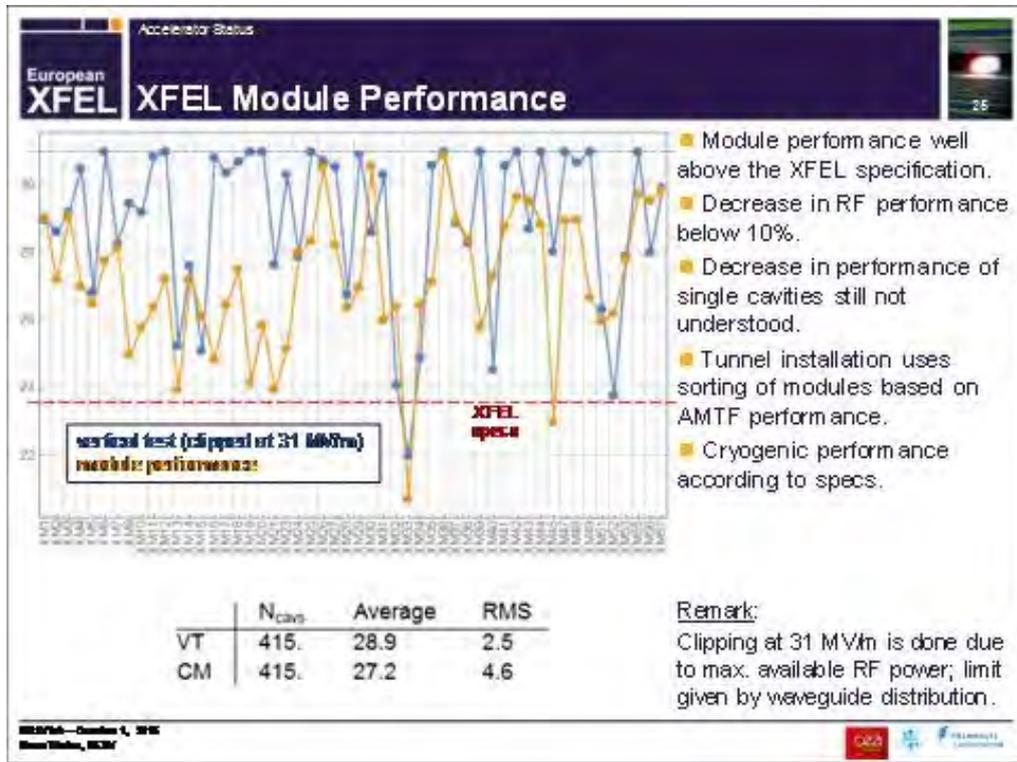
不適合項目のあるモジュールは減少傾向にある。生産開始当初、最初の 10 台ほどはケーブル統合部の品質に問題が多く見付き、修繕作業を必要とした。現在は修繕作業が必要な不適合項目のあるモジュールは全体の 5%に留まっている。

現在の一番の問題はケーブルベローズに真空リークが起きる現象である。常温での修繕は容易であるが、冷却後に見つかることもあり、対応・修理に時間がかかることが問題である。

なお、クライオモジュール 4 台をクライストロン 1 台に連結するため、トンネル内のモジュール配置は試験結果をもとに最適化している。

現在、E-XFEL モジュール 60 台の平均勾配 (27.2 MV/m) は、ILC の加速勾配設計値 31.5MV/m より 14%低い(ただし、要求仕様値が 23MV/mであり、各空洞に 31MV/m の試験上限値を設定している)。E-XFEL モジュールアセンブリは改善傾向にあり、残りのモジュールで性能が向上する可能性はある。31.5MV/m の達成は、依然として課題であるが、達成不可能ではない。

図表 II-18 E-XFEL 用クライオモジュールの加速勾配試験結果



(出典) CEA-IRFU 訪問ヒアリング時入手資料

【クライオモジュールのトンネルへの設置状況】 <DESY>

2015年9月末現在で、クライオモジュール36個（空洞換算で288個）がトンネルに設置され、超伝導加速施設の規模として世界最大になった。設置のペースは2015年夏より1.5モジュール/週となった。これは当初想定されていた1モジュール/週を上回るものである。計画初期の生産能力の立ち上がりが想定よりゆるやかであったため、強化する必要があり、それに応えた形となった。

作業が順調に進めば、2016年5月末までにすべてのクライオモジュールがトンネル内に配置完了される予定である。万が一、不適合なモジュールの利用が不可能となった場合に、モジュール8台分が余剰分として配置されている。

トンネル内設置の工程はまだ習熟中のためスピードは上がりきっていない。冷却部の設置工程はマスターされたが、常温部においては部品調達が遅れていることもあり、全体的に遅れている。

現状では建設終了は、2016年の第3四半期（Q3）の予定であるが、さらなる最適化を続けているところである。遅れが出ればマンパワーのコストが嵩むため、スピードアップをはかりたいとDESYは考えている。

b) LCLS-IIにおけるクライオモジュール (CM) の製造 <FNAL>

【クライオモジュール製造モデル】

LCLS-II では、1.3GHz の CM が 35 台製作され、その内の 1 台はオプション扱いになっている。製作は、FNAL と JLab の全く同じラインにて行われる。これらは、2 つの研究機関で連携を取り進められており、SLAC を含め共通の進め方、共通のテストパフォーマンスデータ、共通の回覧行程管理表などで管理されている。調達については、2 つの研究所で分担して実施されている。

35 台の CM に先立ち、2 つの CM について、プロトタイプとして製作されている。プロトタイプのデザインは、短期間での承認が求められていることから、既存のコンポーネントの最適化として進められている。デザイン、エンジニアリング開発、R&D、核となるスタッフのトレーニング、そしてインフラの更新は、プロトタイプを生産する中で確立されている。2 台の 3.9GHz CM については、効率化のため、1.3GHz CM に引き続き、FNAL にてデザイン、製作、テストが行われる。

プロトタイプを含めすべての加速空洞と CM は、そのまま SLAC 直線加速器トンネルの中で使用される。

【CM のテスト】

1.3GHz プロトタイプ CM のテストは、個々の加速空洞と CM の性能の限界を明らかにするため 4 ヶ月を期限として実施される。

実際には、開始から終了まで 6 週間を制限として実施され、知見の蓄積により、今後は、3 週間程度の実施が想定されている。1 日 24 時間実施するわけではなく、専門家 (またはスタッフ) の通常の出勤時間内で行われる。冷却や加温の時間も必要となってくる。なお、E-XFEL のテスト期間は 12 日間となっている。

テストプログラムは、FNAL と JLab で共通であり、3.9GHz のテストは 1.3GHz の後に実施される。テストの実施に先駆けて、共通認識等の醸成のため、国際的なワークショップが開催された。

【CM 製造に必要なインフラ】

デザイン、調達、設置、テスト (縦測定、横測定) などの実施において追加的なインフラが必要となっている。

CM のテストのためのインフラのデザインは FNAL の SRF テストのための施設にて開発され、既に主要な機器の導入は完了している。2015 年の遅くにはインフラが完成することを見込んでおり、2016 年の早い時期にテスト施設の試運転を終わらせることを計画している。

すべての CM は、FNAL から SLAC に運搬される。輸送費は、FNAL の導入支援費に加算される。輸送期間中は真空中を保たなければならない、トラックから供給される電源で稼働する真空ポンプで保持される。

写真：CM テストのための空間構築



(出典) SLAC 訪問ヒアリング配布資料

図表 II-19 CM 輸送のための設備



(出典) SLAC 訪問ヒアリング配布資料

【調達】

機器の調達は、LCLS-II-4.1-PM-229 という文書に基づき行われており、JLab の SOTR (Subcontracting Officer's Technical Representative) というフレームワークが用いられている。

LCLS-II では、統合が重視されており、機器調達の各段階で FNAL、JLab、SLAC の担当者 (各研究所で任命された調達責任者) が定期的な電話会議を通して密接に仕事を進めること、複数の書類<物理学機器書類 (Physics equipment documents)、機能的必要仕様 (Functional Requirements Specification)、エンジニアリング的仕様書類 (Engineering Specification Documents)、インターフェイス管理書類 (Interface Control Documents) 等>を共通化することなどを進めている。

安全や品質保証に関する情報は、すべての調達管理書類に組み込まれている。

図表 II-20 機器の種類別の調達責任主体

Components	Primary Responsibility		
	FNAL	JLAB	SLAC
Niobium (Prototype) - existing cavities	NA		
Niobium (Production)	X		
Cavities (Prototype) - existing cavities	NA		
Helium Vessels (Prototype)	X		
Cavities w/Helium Vessels Ready for VTS (Production)		X	
Cavity Feedthroughs		X	
Cavity Flanges & Associated Hardware/Seals (VTS and HTS compatible)		X	
Fundamental Power Coupler (FPC)			X
Cavity String Interconnecting Bellows		X	
Cavity String Assembly Hardware and Seals	X		
SC Magnet Assembly	X		
Beam Position Monitor (BPM)	X		
Gate Valves		X	
Beamline Vacuum Monitoring Manifold & Gauge	X		
Two-phase Pipe Bellows	X		
Tuner System tuner, actuator, piezos (Prototype)	X		
Tuner System tuner, actuator, piezos (Production)		X	
Magnetic Shielding	X		
GRHP Sub-assembly	X		
Vacuum Vessel	X		
Coupler Pumping Lines and Pumps (ion+TSP) + vacuum gauges	X		
Instrumentation	X		
Liquid Level Probes and JT Valve	X		
Beamline Interconnect Parts including Aluminum Heat Shields	X		
HOM Absorber		X	
Shipping Frames and End Caps + Shock Log Devices		X	

(出典) SLAC 訪問ヒアリング配布資料

(3) クライオモジュールの評価と技術的課題

①ILC用クライオモジュールの加速勾配目標達成の可能性と課題<DESY、KEK>

DESYが実施したE-XFEL用モジュール内に空洞を統合した後の性能試験では、31MV/mを上限としている。また、縦測定はCW測定なのに対し、モジュール試験はパルス試験である。他にも様々な条件の違いがある。一般的にはモジュール試験では縦測定よりも若干低い性能になる。

E-XFELのクライオモジュールの加速勾配は、空洞単体に比較して低下(degradation)したが、その正確な理由は不明である。プロジェクト推進期間中の直接的検証は行われておらず、間接的な統計分析による原因追求の解析が行われているのみである。これまで実施されたのは、モジュール内の空洞位置による加速勾配性能劣化の違い、性能を決めている原因の割合分布、クリーンルーム内作業手順の違いによる性能劣化の違いなど、間接的な検証である。その中では、作業手順を変えた結果性能が良くなったという報告が一部されている。

直接検証するには、一度組立てられたモジュールを分解する必要があり、分解プロセスの中でゴミが混入することがあり得るので、原因を突き止めることは難しい。想定される原因としては、各作業工程の中でのパーティクル(ゴミの微粒子)混入、組立時やアルゴンガス導入と真空排気の手順時の手順ミスによるパーティクル混入などが挙げられる。

②クライオモジュールの性能向上に向けた技術開発の課題<KEK>

クライオモジュールの性能向上や工業化に向けた技術面での課題として、以下の点が指摘されている。

- ・モジュール内での空洞性能劣化の防止策の開発
- ・低コストのアセンブリ方法の開発
- ・低コストのクライオモジュール内の空洞アライメントの維持方法の開発
- ・モジュール内空洞アライメントの高精度な検出方法の開発
- ・低コストの温度モニター方法の開発 等

③クライオモジュールの性能向上と量産化に向けた製造工程の課題

クライオモジュールの性能向上と量産化に向けた製造工程での課題として、ヒアリング及びアンケート調査によれば、以下の点が指摘されている。

■モジュール組立の作業工程手順の共有化<KEK>

改善されつつあるE-XFELのクライオモジュール組立の作業工程手順を、ILCの各ハブラボ(モジュールの組立てを担う拠点研究機関)に徹底させることが重要である。

■クリーンルームにおけるクリーン度と作業品質の管理・向上<KEK>

クリーンルーム内で使用する治具、部品及び排気システムを、クリーン度を上げて管理し、クリーンルーム内組立作業の工程を手順通りに高品質に行うように作業員を訓練し管理することが重要である。

■モジュールの部品のクリーン度の向上<KEK>

各ハブラボにおいては、モジュールの部品表面に発生するフレーク及びパーティクルを最小にする対応を行ない、クリーン度を高めることが重要である。例えば、ボルト（ネジ）の表面からエアガンでは取れないゴミを除去するために、電解研磨をかけるなどの対応が必要になるかもしれない。

なお、クライオモジュールの量産化の課題と実現可能性についての研究機関・企業へのアンケート回答結果を示すと、次図表のとおりである。

図表 II-21 クライオモジュールの量産化の課題と実現可能性（アンケート結果）

項目	内容
■空洞量産化の課題	<p>【ALSYOM 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・量産化の課題は、以下のとおり。 <ol style="list-style-type: none"> ①供給部品の信頼性及び可用性（availability） ②重要部品の性能再現性（空洞、カプラー） ③効率的な一貫製造工程を維持する能力 ④生産フローの速度に影響を与えずに、製造工程における不適合品を管理する能力 ・上記は CEA-IRFU（Saclay）での経験をもとに抽出。特に①及び④については、カプラーや空洞などの重要部品で不適合項目があった場合、工程の最初で不適合項目を発見できれば入れ替え対応などで問題なく対応できる。しかし、工程の途中で、特にアセンブリの後で不適合事項が発見された場合は、モジュールの解体が必要となり対応がより難しくなる。工程の数が多いこのような作業では重要部品の“reliability”が非常に重要である。
■量産化手法のメニュー	<p>【ALSYOM 社】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・量産化手法のメニューは以下のとおり。すべての項目は Saclay での経験を元としている。 <ol style="list-style-type: none"> ①作業場の規模及び生産設備の拡大 ②労務管理 ③生産人員の体制（シフト等） ④効率的な生産、「ムダ」の削減 ⑤物流・在庫管理 ⑥サプライヤー管理

	<p>⑦品質管理（製品及びシステム）</p> <p>⑧設定管理</p> <p>・上記のうち、③の人員の配置とシフトの管理、①が最重要であると考え るが、すべての項目が重要である。④は 作業工程の流れを改善する上で 重要である。⑥の 供給チェーンがスケジュール通りに動くのは重要であ り、そのためには十分なバッファストック（緩衝在庫）が必要である。</p>
■量産化手法の 技術的な実現可 能性・実現時期	<p>【ALSYOM 社】</p> <p>・作業場の規模及び生産設備：1.5～2 年（建屋建設の必要性によって異なる）</p> <p>・人員の増強：6 ヶ月+3 ヶ月の訓練</p> <p>・連続生産能力の増強：9 ヶ月"</p>
■量産化手法の 経済的な実現可 能性	<p>【ALSYOM 社】</p> <p>・作業指示書及び技術要件に従って規定される。</p>

④クライオモジュールを日本で集約・結合する場合の課題

ILC 計画への参加各国で製造されたクライオモジュールを各国から日本へ輸送し、日本で集約・結合（組立）する場合の問題（イシュー）を、「場所・輸送」、「性能・品質」、「規制・管理」の視点から整理する。

A：場所・輸送の問題（イシュー）

図表 II-22 クライオモジュールの場所・輸送に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■長さ・サイズの問題（イシュー）	<p>・日本へ出荷する場合、完全なクライオモジュールは標準的な 40 フィート（12.2m）のコンテナには長すぎる（計画されている ILC モジュールは E-XFEL モジュールより長い）。<DESY></p> <p>・モジュールの長さが標準的な航空貨物の制限寸法を超えるかどうかに関する調査は必要である。<RI 社></p> <p>・機器のサイズによる輸送上の制約がある<ALSYOM 社></p>
■振動・衝撃による性能低下の問題（イシュー）	<p>・クライオモジュールは、振動に関して非常に厳しい制約の下で出荷される。モジュールは特殊な「減衰」されたフレーム内に設置され、輸送中の加速度を記録するために計装される。輸送ルートは舗装された道路を通るように慎重に選定する。日本への出荷は、必然的に飛行機又は船を使用する。これらの場合の取扱い条件は不明であるが、おそらく「衝撃」を受ける可能性はある。日本と他の場所の間の輸送方法については試験する必要があるが、（必要であれば）海上輸送又は航空貨物用の特殊な</p>

	<p>輸送用フレームを開発しなければならない。＜DESY＞</p> <ul style="list-style-type: none"> ・モジュールの輸送（海上輸送または航空輸送）は、適切な梱包システムが使用されていれば、性能が低下することはない。＜Zanon 社＞ ・適切な輸送用フレームが使用される限り、クライオモジュールの出荷について大きな問題はないと考える。＜RI 社＞ ・輸送環境条件（振動、衝撃、酸化等）に起因する性能低下のリスクがある。＜ALSYOM 社＞ ・海上コンテナ輸送の場合、船上へ・船上からの荷揚げ・荷下ろし時にクライオモジュールへ与える衝撃に緩和機構の開発・実証が必要。また、クライオモジュールの組立場所(ILC サイト、KEK、各メーカー等)の検討が必要である。＜三菱重工＞
■税・輸送コストの問題（イシュー）	<ul style="list-style-type: none"> ・管理上の問題は、輸出入税のコストを最適化することである。コスト、物流、及び時間の問題。航空輸送は、輸送時間の問題を解決するが、コストを増加させる。＜Zanon 社＞
■陸上輸送条件の問題（イシュー）	<ul style="list-style-type: none"> ・クライオモジュールのトラックによる陸上輸送は、E-XFEL で実証済みである。フランスのパリ (CEA-IRFU) ⇒ ドイツのハンブルグ (DESY) 間でのトラック輸送技術は実証されている。しかし、日本の場合輸送条件（道路、トラック）が異なるため、最寄り港湾から ILC サイトまでの輸送シミュレーションが必要である。＜DESY＞

B：性能・品質の問題（イシュー）

図表 II-23 クライオモジュールの性能・品質に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■長期使用による性能低下	<ul style="list-style-type: none"> ・DESY において E-XFEL 向けの空洞で見られる主な「性能低下」は、初期の受け入れ試験と完成モジュール試験の間の空洞性能の低下である。現在の E-XFEL 向けの実績では 7～10%の平均勾配の減少が見られるが、CEA-IRFU (Saclay) における最新のモジュール組立では改善の傾向が見られる。なお、E-XFEL 向けの生産で達成された勾配は ILC 要件を約 10%下回ることに注意しなければならない。＜DESY＞ ・クライオモジュールの長期的な性能低下は予想していない。当社のモジュールは、12年以上にわたって顧客の装置内で性能低下することなく動作している。＜RI 社＞ ・適切な設備と良好なメンテナンスを行えば、性能が低下することはないはずである。これは基本的に、製造工程及び完成した空洞の保管に当てはまる。製造中の重要な要因 (critical factor) は、作業者の作業（クリーンルーム作業）の継続的な信頼性であるかもしれない。性能低下を防止するため、製造中の化学製品の劣化やフィルターの寿命を管理・監視

	<p>する必要がある。<Zanon 社></p> <ul style="list-style-type: none"> ・クライオモジュールの連結時のダスト侵入防止など、クリーンルーム外での作業の影響を排除する仕組みが必要<三菱重工>
--	--

C：規制・管理の問題（イシュー）

図表 II-24 クライオモジュールの規制・管理に係る問題（イシュー）

項目	問題（イシュー）
■ 高圧規則	<ul style="list-style-type: none"> ・最も重要な問題は、高圧洗浄（HPC）規則の問題である。E-XFEL 向けの生産では、TUV-Nord の規制により、HPC はドイツの規格に適合しなければならなかった。これには、ベンダー（イタリア、ドイツ）及び CEA-IRFU（フランス）のモジュール組立施設における溶接工程の認定が含まれる。DESY では、日本向けに生産されているモジュールも、日本の HPC に適合するために同様の認定と準備が必要になると想定している。<DESY> ・高圧ガス保安法の合格証発行から完成検査までに有効期限があること、また、各国による高圧ガス関連法規が異なることに起因する問題がある。 <ul style="list-style-type: none"> ①日本国内では、高圧ガス保安法で規定される。 ②欧州では、EU の圧力装置指令で規定され、TUV 社が設計・評価・承認までを受け持つ。 ③米国では、ASME(米国機械工学学会)工業基準で規定され、設置される研究組織の長が承認。日本で ILC を建設する場合、欧州メーカーは TUV の指導により日本で高圧ガス保安法を満足するよう準備することが可能であるが、米国メーカーについては TUV 社以外に日本の高圧ガス保安法を満足するよう指導できる機関があるか検討必要<三菱重工>
■ 製造規格	<ul style="list-style-type: none"> ・製造工程内で適用される日本と欧州の規格・規制の違い<ALSYOM 社>
■ 安全要件	<ul style="list-style-type: none"> ・現時点では判断できないが、欧州で「安全」であれば日本でも「安全」であるはずである。可能であれば、該当する安全要件を複数国生産に対応して調整すべきである。<Zanon 社>