

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
概要版

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 Superconductivita Applicat)
	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

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

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（図表 4 参照）。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、有効的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
超伝導加速器技術	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、HPRI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 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) SRFI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らない	○	■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 (パルス電流電解研磨、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 ・生産労働力シフト制の導入 ・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
	クライオモジュール	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	CERN 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あり> ・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 パルス線返周波数: 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 ・マルクス型電源(モジュレータ)は、次の3タイプあり ①SLAC-P2電源、②KEKチョッパ型電源、③DTI電源 ●要求性能未達成 ・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> ・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 ・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 ・KEK、パルスパワー技術研究所(日) ・SLAC ●製造(量産化) ・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 ・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) ・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) ・Thales社(仏) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・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 ・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 ・ILC TDRの仕様は満たしており特に無し ●製造的課題 ・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) ・CPI社(米) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・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 ・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 ・ILC TDRの仕様は満たしており特に無し ●製造的課題 ・量産化には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ンジニアリング、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) ・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】 ・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 ・EXFEL用TTF-III入力カプラーを生産・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 ・特に無し ●製造的課題(一部) ・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EBW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 ・LAL ●製造(量産化) ・RI社(独)、Thales社(仏) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・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 ・EXFEL用TTF-III、LCLS-II入力カプラーを生産・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 ・特に無し ●製造的課題(一部) ・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 ・未定 ●製造(量産化) ・CPI社(米) 【ILC要求に対する企業の量産化可能性】 ・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 ・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 ・特になし ●製造的課題(一部運用面の課題含む) ・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、真空ろう付設備等) ・(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 ・未定 ●製造(量産化) ・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】 ・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ート制御 ■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) ・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 ・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) ・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一体型の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) ・導波管や素子の溶接から鋳物への変更 ・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) ・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) ・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】 ・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"> ■パンチ繰返し率: 3MHz ■平均電流: 32μ A ■ピーク電流: 4.8A ■電荷量: パンチ当たり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相当のシングルパンチの電荷量(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(マルチパンチ)は未検証 ・マルチパ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FELseeding用レーザーシステムがILCレーザー仕様にかなり近くILCに有用(DESU) 	<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) ・マルチパ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 ・DESU(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"> ■パンチ数: 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/パンチ (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 ・回転体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、ブ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トロン光源のうち数基は、ILCのDRIに必要なビーム性能と同等の性能(超低エミッタンス、パンチ数、パンチ間隔等)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、パンチ数、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) (距離の短いパンチの大量処理、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(=マルチパ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点にパ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 ■クワイオモジュール ■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 ・クワイオモジュール/クワイオスタット: 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 ・クワイオモジュール/クワ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)

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

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	ALSYOM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										
			ROARK社	AES	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Jefferson Lab	Fermi Lab	Fermi Lab	Fermi Lab	CPI	CPI
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。 既存の研究に必要となる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

【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

図表4 ILC山岳トンネルで想定されている NATM 工法の概要

NATM工法 ① 掘削

発破工法の事例
ILCの主工法（一部は機械掘削）

含水爆薬



爆薬装填状況



発破完了

NATM工法 ② ずり出し

レール方式



ズリ出し状況(タイヤ方式)

ILC標準工法



ベルトコンベア方式 補助的に適用



NATM工法 ③ 吹付け・支保

掘削(1m~2m)完了後ごとに、支保部材で周辺地山を保持する。
・支保工の組合せやサイズ、仕様などは地山状況によって決定



吹付けコンクリート工



鋼製支保工建込み

ILC適用工法

NATM工法 ④ 防水・鉄筋

防水シート設置

掘削面(支保工)と覆工コンクリートの間に設置する。

ILC適用工法



補強鉄筋

* 坑口部等で補強鉄筋が必要とされた場合に設置する。

部分的に適用



防水シート設置

鉄筋

NATM工法 ⑤ 覆工コンクリート

コンクリート用型枠(組立中)



覆工コンクリート

- ・セトル型枠をセットしてコンクリートを打設する。
- ・1回の打設長は10m程度

ILC適用工法(ビームトンネルのみ)



NATM工法 覆工コンクリート完了

床版コンクリート：未施工



覆工コンクリート打設完了

(出典)「山岳トンネルの施工概要」KEK

図表4 ILC山岳トンネルで想定されている NATM 工法の概要

