

国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究
調査報告書

平成 30 年 2 月

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構

はじめに

本報告書は文部科学省からの委託を受けて本機構が行った「国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究」について、その結果をまとめたものである。

次世代の大型加速器実験施設構想として、国際リニアコライダー（ILC: International Linear Collider）計画（以下「ILC 計画」という。）の技術設計報告書（Technical Design Report、以下「TDR」という。）が、平成 25 年 6 月に素粒子物理学分野の国際コミュニティより発表された。文部科学省に設置した「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議 技術設計報告書（TDR）検証作業部会」において検証を行った結果、土木建築を含む加速器本体の建設費が 8,309 億円、本体建設に必要な労務費が 1,598 億円、測定器本体費用が 766 億円、測定器建設に必要な労務費が 239 億円となっており、土木建築を含む加速器及び測定器本体に関わる費用の総計で約 1 兆 912 億円と見積もられた。

文部科学省は米国エネルギー省（DOE: United States Department of Energy）と行政的事項について意見交換を行うため「ディスカッショングループ」を設置し、ILC 計画の実現の可能性を高めるためには、大幅なコスト削減を目指すことが不可欠との共通認識の下、コスト削減に向けた日米共同研究の可能性について優先的に検討している。

本調査研究はかかる状況の中、文部科学省からの委託を受けて本機構が行ったものであり、具体的には、土木建築を含む加速器及び測定器本体建設を対象に、TDR からのコスト削減につながる要素技術の研究開発課題を挙げ、これら課題についてコスト削減の効果額、そのための研究開発に要する期間と額に関して調査研究を行った。

また、特に、上記の日米共同研究で挙げられている「低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化」（以下、略称「新ニオブ材料」）及び米国・フェルミ国立加速器研究所（FNAL: Fermi National Accelerator Laboratory）で開発された「高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理」（以下、略称「高電界・低損失空洞」）の 2 件について、本機構にて行う技術的な検証および米国を含む世界の超伝導技術開発の実例調査に基づく検証を行うことにより、空洞の低価格化・高性能化によるコスト削減効果、研究開発に要する期間・額について詳細に調査研究を行った。

なお、本調査研究を実施するにあたっては、大型加速器実験施設に関係した有識者や関連する分野の研究者等による「国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究委員会」を本機構に設置し、調査研究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。

国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究委員会委員名簿

(五十音順)

氏 名	所属・職名
芥 川 真 一	神戸大学 大学院工学研究科 教授
池 田 直 昭	三菱重工機械システム株式会社 設備インフラ事業本部 制御技術部 部長
柏 木 茂	東北大学 電子光理学研究センター 准教授
○上垣外 修 一	理化学研究所 仁科加速器研究センター 加速器基盤研究部 部長
神 門 正 城	量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 高強度レーザー科学研究グループリーダー
◎熊 谷 教 孝	公益財団法人高輝度光科学研究センター 名誉フェロー
佐 藤 潔 和	東芝エネルギーシステムズ株式会社 京浜事業所 技監
竹 内 一 浩	株式会社日立製作所 原子力ビジネスユニット 原子力事業統括本部 原子力事業技術センタ シニアプロジェクトマネージャ
田 中 均	理化学研究所 放射光科学総合研究センター 副センター長
細 貝 知 直	大阪大学 大学院工学研究科 准教授 ／理化学研究所 放射光科学総合研究センター 先端光源開発 研究部門 レーザー加速開発チーム チームリーダー
山 本 明	CERN Guest Professor
山 本 均	東北大学 大学院理学研究科 教授

◎は委員長、○は委員長代理

調査研究の目標と方法

1. 調査研究の目標

ILC の TDR を精査し、加速器、測定器はもとより、加速器土木（トンネル本体や地上施設）などを含めてコスト削減につながる要素技術の研究開発課題について調査研究を行う。また、日米共同で進められるコスト削減の課題についても、世界的な動向について調査を行うとともに、本機構でも研究調査を行う。各成果目標については以下の通りである。

- (1) 現在コスト削減のための研究開発が進められているか、他の加速器プロジェクトで採用されつつある項目

日米共同で進められている研究開発（「新ニオブ材料」および「高電界・低損失空洞」）など、ILC のコスト削減のために進められている研究開発課題や他の加速器などで進められている研究開発課題について研究調査を進め、コスト削減の効果を評価する。

- (2) 中長期的な研究課題

コスト削減に結び付く中長期的な研究開発課題（10 年程度の研究開発期間を要するもの）について広く調査を行う。

- (3) 加速器土木関係の研究開発項目

加速器土木関係の研究開発項目について、建設コスト削減につながる項目を提示、コスト削減効果を見積もる。

- (4) 測定器本体の研究課題

測定器本体のコスト削減に結び付く研究開発課題について広く調査を行う。

- (5) 超伝導加速以外の加速方式

現在提案されている常伝導リニアコライダー（CLIC）および新しい加速技術であるプラズマ加速についても、研究開発の現状について調査を行う。

2. 調査研究の方法

- (1) 整備コスト削減に関する要素技術の研究開発課題の探索・検討

エリアシステム（電子源、陽電子源、ダンピングリング、主線形加速器、最終収束系、検出器、加速器土木）ごとに精査する。新たな研究開発によりコスト削減につながるものの探索・検討を行う。

- (2) 要素技術の研究開発課題に係る削減効果額、研究開発期間、研究開発費用

本項の（1）で行われた探索・検討をもとに、各々の研究開発課題について ILC 計画に採用された場合の削減効果や研究開発に必要な期間、金額などについても見積もる。コスト削減については、TDR の土木建築を含む加速器および測定器本体建設に関わる費用の見積もりを参考にして効果の算出を行うこととする。

目 次

はじめに	i
国際大型加速器計画のコスト削減に関する調査研究委員会委員名簿	ii
調査研究の目標と方法	iii
1. 調査研究の目標	iii
2. 調査研究の方法	iii
I. 全体の要約と結論	1
1. 調査研究の結果	1
2. コスト削減評価	4
1) 加速器本体（加速器土木を含む）の研究開発項目	4
(1) 現在コスト削減のための研究開発が進められているか、ほかの加速器プロジェクトで採用されつつある項目	4
(2) 中長期的な研究開発課題（10 年程度の研究開発期間を要するもの）	5
(3) 加速器土木関係の研究開発項目	5
2) 測定器本体の研究開発項目	5
3) 超伝導加速以外の加速方式	6
II. 調査研究結果	7
1. ILC の概要	7
1) ILC の構成	7
2) ILC 加速器本体の建設費用（Value）	9
3) ILC 加速器の労務費（Labor）	10
4) ILC における電力使用量	12
5) ILC 測定器の建設費	12
2. 電子・陽電子源	13
1) 電子源	13
2) 陽電子源	14
(1) アンジュレータ方式	15
(2) 電子駆動方式	17
3. ダンピングリングおよび RTML（Ring to Main Linac）	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
(1) ダンピングリング	19
(2) RTML（Ring to Main Linac）	20
2) コスト削減に関する検討	21
4. 加速器・主線形加速器検討結果	26
1) 主線形加速器の全体構成とコスト	26
2) 主線形加速器の主要構成部品とその仕様	27
3) 主線形加速器主要構成部品のコスト低減化の検討課題	31
5. ビーム供給・最終収束系（BDS: Beam Deliverly System）	32

1) 調査の対象.....	32
2) BDS ビームラインの概要	32
3) コスト削減の検討	34
(1) 反ソレノイドコイルの検討.....	34
(2) 最終収束電磁石の冷却システムの検討	35
(3) ビームダンプの検討.....	35
(4) 偏向電磁石の永久電磁石化の検討	35
6. 加速器土木.....	36
1) 調査の対象.....	36
2) 調査項目.....	37
(1) 前方切羽の高速地質探査によるリスク回避.....	37
(2) トンネル掘削のスピードアップによるスケジュール短縮	38
(3) 高速大量ズリだしによるスケジュール短縮.....	38
(4) 覆工コンクリートの高速施工によるスケジュール短縮	39
(5) 合理的な中央遮蔽壁建設によるスケジュール短縮	39
(6) 合理的な測定器ホールと付随する垂直シャフト施工方法の選択.....	39
7. 測定器	41
1) 調査の対象.....	41
2) TDR に示された測定器の概要	41
3) TDR 以降の進展	43
4) コスト削減が見込まれる研究開発	43
(1) 鉄リターンヨークの鉄の量の削減	44
(2) 新しい超伝導線材の開発	44
III. コスト削減効果.....	45
1. コスト削減の評価.....	45
2. DR および RTML,BDS での永久磁石の利用	46
1) ダンピングリングでの可能性	46
2) RTML での可能性	48
3) BDS での可能性	48
4) コスト削減の評価	49
5) 研究開発に必要な期間および費用	49
3. 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化	51
1) はじめに	51
2) 技術開発の実績（国際、国内）	54
3) コスト削減案に基づく Nb 材料特性要求	55
4) コスト削減の評価	56
5) 研究開発に必要な期間および費用	57
4. 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理（N-Infusion）	58
1) N-Infusion の概要	58
(1) N-Infusion について.....	58

(2) N-Infusion の場合の全体工程	58
(3) N-Infusion の手順	59
(4) N-Infusion の理論的背景.....	61
2) N-Infusion の世界的な動向・最新の状況.....	62
(1) フェルミ研究所での結果	62
(2) ジェファークソン研究所での結果.....	63
(3) DESY での結果	64
(4) KEK / J-PARC での結果	65
(5) 高加速勾配・高 Q 値を実現するための条件	66
3) コスト削減の評価	67
(1) 加速空洞、クライオモジュール等の数量の削減効果.....	67
(2) ヘリウム冷凍機の冷凍能力の削減	67
(3) 仕上げ電解研磨処理工程が無くなるための工程の簡略化	68
(4) コスト削減の見積り	68
(5) その他	69
4) 研究開発に必要な期間および費用	70
5. N-Infusion 活用のための高周波系の研究開発（高電界運転に向けて）	72
1) 大電力高周波源の研究開発の概要.....	72
2) コスト削減の評価	74
3) 研究開発に必要な期間および費用	74
6. 入力カプラ	76
1) 背景.....	76
2) 開発の現状.....	77
(1) セラミック材料に関するもの.....	77
(2) セラミックに施すコーティングに関するもの.....	78
3) コスト削減の評価	79
4) 研究開発に必要な期間および費用	79
(1) セラミックの二次電子放出係数測定	79
(2) TiN コーティング無しのセラミック材の開発.....	79
7. 電解研磨.....	82
1) 研究開発の概要.....	82
2) 縦型電解研磨およびバイポーラ電解研磨	84
3) コスト削減の評価	86
4) 研究開発に必要な期間および費用	86
8. 超伝導薄膜.....	88
1) 研究開発の概要.....	88
2) 超伝導体多層薄膜	88
3) メッキ法	89
4) コスト削減の評価	90
5) 研究開発に必要な期間および費用	90

9. 液圧成形	92
1) 液圧成形空洞の概要	92
2) 世界的な動向	93
(1) 他施設での動向	94
(2) KEK での動向	94
3) コスト削減の評価	95
4) 研究開発に必要な期間および費用	96
10. 加速器土木のコスト削減	98
1) 掘削量削減によりコスト削減できる項目	98
2) 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更	98
3) ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更	99
4) 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化	101
5) 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化	103
6) コスト削減の効果	105
11. 測定器のコスト削減	107
1) リターンヨークの鉄の量の削減に関する研究開発	107
(1) 概要	107
(2) 世界的な動向と最新の状況	107
(3) コスト削減研究開発の状況	108
2) 新しい超伝導線材の開発	108
(1) 概要	108
(2) 世界的な動向と最新の状況	110
(3) コスト削減研究開発の状況	110
IV. 超伝導以外の加速方法	111
1. 常伝導コライダー	111
1) CLIC	111
2) CLIC の原理	111
3) CLIC のレイアウトとパラメータ	112
4) 超伝導コライダーとの違い	113
5) CLIC のコスト	113
6) CLIC の消費電力	114
7) CLIC 技術の完成度	115
8) クライストロンコライダー	116
2. プラズマ加速	117
1) プラズマ加速の原理	117
2) プラズマ加速の原理により ILC 相当の加速器を作る場合の課題	117
(1) ビームの性質について	117
(2) 陽電子の加速について	118
(3) コスト・電力効率について	119
(4) プラズマ加速で達成しているパラメータのまとめ	119

3) プラズマ加速適用可能性.....	120
4) 研究開発に必要な期間及び費用.....	120
V. まとめ.....	123
1) 加速器本体（加速器土木を含む）の研究開発項目.....	123
(1) 現在コスト削減のための研究開発が進められているか、ほかの加速器プロジェクトで採用されつつある項目.....	123
(2) 中長期的な研究開発課題（10年程度の研究開発期間を要するもの）.....	123
(3) 加速器土木関係の研究開発項目.....	124
2) 測定器本体の研究開発項目.....	124
3) 超伝導加速以外の加速方式.....	124
(補遺)	130
A. ILC 250 GeV ステージングについて.....	130
1) ILC 250 GeV の構成.....	130
2) ILC 250 GeV におけるコスト削減効果.....	131

I. 全体の要約と結論

1. 調査研究の結果

国際リニアコライダー（ILC: International Linear Collider）は、全長 30km 超の電子・陽電子衝突型加速器である。図 I-1-1 にその概要を示す。ILC の加速器は、電子・陽電子源(e-/e+ source)、これらのビームのエミッタンス（ビームの広がりに対応する値）を小さくするダンピングリング（DR: Damping Ring）、ダンピングリングから主線形加速器までビームを輸送し、ビームバンチ長（軸方向の塊長さ）を圧縮するバンチコンプレッサー（Bunch Compressor）を含む RTML（Ring to Main Linac）、超伝導技術を用いてビームを加速する主線形加速器（Main Linac）、ビーム衝突点におけるビーム衝突の強度を示す輝度（ルミノシティ）を高めるための最終的なビームの収束・調整を行うビーム供給・最終収束系(BDS: Beam Delivery System) と衝突の反応を計測するための測定器（Detector）が設置される衝突点（IR: Interaction Region）から構成されている。

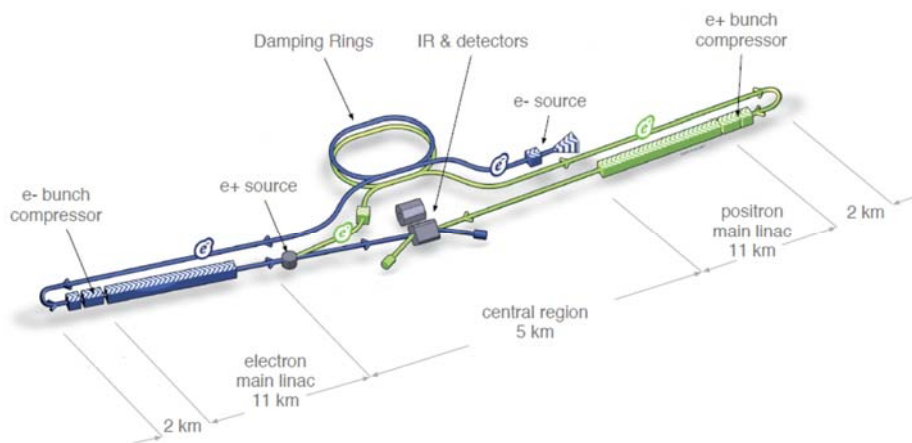


図 I-1-1 ILC の概略（出典：ILC-TDR）

加速器は 1 秒間に 5 回の頻度（5 Hz）でパルス運転される。パルス内には 1,312 個のビームバンチが形成され、電子源および陽電子源からは 1 バンチあたり 2×10^{10} 個の電子および陽電子が生成される。超伝導加速器部分では、合計 16,000 個程度のニオブ製の超伝導加速空洞が使用される。これら空洞はクライオモジュールと呼ばれる保冷容器に収められ、液体ヘリウムにより低温に保たれる。クライストロンと呼ばれる大電力増幅器から出力される大電力高周波は、入力カプラと呼ばれる部品を通じて空洞に投入され、1 空洞当たり平均 31.5 MV/m の電界を発生させる。一つのクライストロンの大電力高周波（最大 10 MW）は 39 台の空洞に分配される。

2 台の測定器 SiD（Silicon Detector）と ILD（International Large Detector）は、ILC の一つの衝突点を共有して設置され、いわゆる“push and pull”方式で測定器を入れ替えることで 2 実験を実施する。

技術設計報告書（TDR: Technical Design Report）の見積もりは物品費（Value）と労務費（Labor）に分けられ、TDR の Value のコスト見積もりは仮想通貨 ILC ユニット（ILCU）を使って行われている。ILCU は 2012 年 1 月現在の購買力平価を基に 1 ILCU=1 米国ドルと定義されている。土木建築を含む加速器建設コストは総額 7,980 MILCU（百万 ILCU、以降同様）であり、文部科学省の TDR 検証作業部会では、国際入札を考慮し 1 ユーロ 115 円、1 ドル 100 円を仮定して、日本円にして約 8,300 億円とされている^[I-1-1]。

加速器建設コストについて加速器施設ごとに分類したものを図 I-1-2 に示す。主線形加速器部分は 5,200 MILCU と、ILC 加速器全体の 2/3 程度を占めていることがわかる。ここで、Common はメインキャンパス（154 MILCU）や主電力受電部分（加速器では 164 MW 程度の使用を想定）、一般的なネットワークおよびコンピュータシステム（電子メールなど）、加速器制御などを含んでいる。IR に設置される測定器のコストは、別途物理測定器のコストとして分類され、ここでは測定装置を入れるための実験ホールのコストが含まれている。TDR では特定の建設サイトを想定しておらず、建設サイトに依存する費用（電力や水のサイトまでの取り込み配線など）は含まれていない。また、地質調査、ボーリング費用など、本建設前に行う費用についても含まれていない。

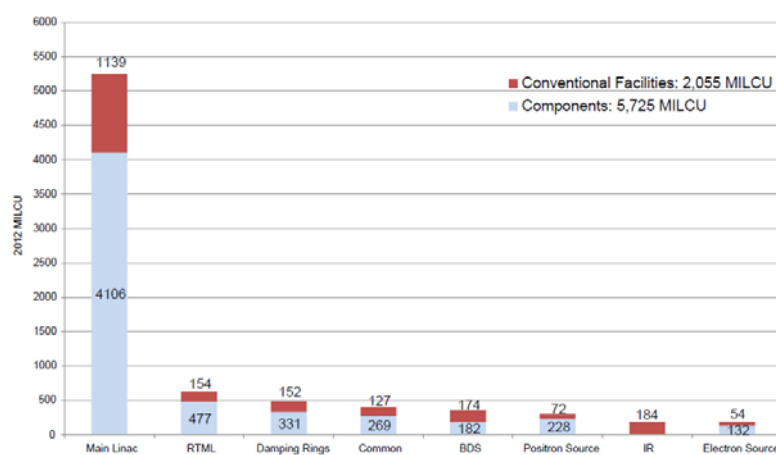


Figure 15.8. Distribution of the ILC value estimate by system and common infrastructure, in ILC Units. The numbers give the TDR estimate for each system in MILCU.

図 I-1-2 ILC の加速器施設毎の建設コスト（出典：ILC-TDR）

ILC では先に述べたように、ILD と SiD という二つの測定器を置く予定である。TDR（Vol.4 Detectors）によれば、ILD のコストは 391.8 MILCU、SiD のコストは 315 MILCU で、労務は、ILD が 1,400 人年、SiD が 748 人年となっている。

これらの ILC 構成要素について、新たな研究開発によるコスト削減の可能性について調査を行った結果を表 I-1-1 にまとめる。次章以降に別途記載するが、現在コスト削減のための研究開発が進められているのは下記の 4 件である。

- 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化
- 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理（N-Infusion）
- 入力カプラ
- 電解研磨

これらの研究開発がすべて成功した場合は、5～11%程度のコスト削減が見込まれる。

参考文献

- [I-1-1] 文部科学省国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（第 3 回） 配付資料 資料 1-2
技術設計報告書（TDR）検証作業部会報告
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/shiryo/1357375.htm

表I-1-1 新たな研究開発によるコスト削減可能性の調査結果

エリアシステム	略称	サーベイの内容	コスト削減につながる研究開発課題
電子源	e ⁻ source	コスト削減として電子銃システムを1系統にする、RF電子銃にしてバンチャーをなくすことが考えられるが、前者は新技術ではなく、後者もカソード破壊を防ぐ方法が確立していない。 新技術によるコスト削減方法は見いだせなかった。	
陽電子源	e ⁺ source	アンジュレータの周期を短くし、それによる陽電子数増加分、これを短くする、RFパルス圧縮により1ユニットで駆動できる加速管本数を増やすなどが考えられるが、いずれも既存の技術開発で、新技術によるコスト削減方法は見いだせなかった。	
ダンピングリング	DR	TDR以降、大型放射光施設の高度化計画が進み、消費電力を軽減するために、電磁石を永久磁石で置き換えるR&Dが進んでいる。ILC-DRやRTMLにおいても、永久磁石化による運転コストの削減が見込まれる。	1. 永久磁石型可変式偏向磁石 2. 同四極磁石
RTML	RTML		
主線形加速器	ML	主線形加速器の主要構成部品であるクライオモジュール、超伝導空洞、入力カプラ、周波数チューナー、大電力高周波源システムなどにおいて、コスト低減化の可能性について調査を行った。 低コスト・ニオブ材や高電界・低損失実現のための表面処理などのコスト削減方法を見出した。	1. 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化 2. 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion) 3. 入力カプラ 4. 電解研磨 5. 超伝導薄膜 6. 液圧成形
ビーム供給・最終収束系	BDS	TDR以後も最終収束電磁石システムの小型化に伴うR&Dが進行中であり、それに伴うコスト削減効果を検討したが、コスト削減効果は見込めなかった。偏向電磁石を永久磁石に置きかえることで運転コストの削減が見込まれる。	永久磁石型可変式偏向磁石
加速器土木	CFS-civil	コスト削減に大きな効果をもつ事項は、地下施設の掘削量の削減と掘削スケジュールの短縮であり、今の時点で掘削スケジュールの短縮の方法は、 (1) 前方切羽の高速地質探査によるリスク回避 (2) トンネル掘削のスピードアップによるスケジュール短縮 (3) 高速大量ズリだしによるスケジュール短縮 (4) 覆工コンクリートの高速施工によるスケジュール短縮 (5) 合理的な中央遮蔽壁建設によるスケジュール短縮 (6) 合理的な検出器ホールと付随する垂直シャフト施工方法の選択、である。これらは新しい技術によるものではないがコストの削減の可能性がある。 掘削量の削減として中央シールド壁厚変更などのコスト削減方法がある。	(1) 中央シールド壁厚変更 (2) ヘリウム冷凍機配置変更 (3) 検出器ホールアクセスの最適化 (4) 加速器配置の最適化
測定器	Detectors	TDRに記述された内容、ならびに年2回開催されるリニアコライダーの国際会議やその他の国際的研究会における研究成果発表などからコスト削減項目の調査を行った。 リターンヨーク鉄の削減や新しい超伝導線材の開発によるコスト削減が見込まれる。	鉄リターンヨークの鉄の量の削減 新しい超伝導線材の開発

2. コスト削減評価

TDR に記載されたコスト（2012 年 1 月時点のコスト）から、新しい研究開発によってどの程度コスト削減できるかを評価した。機器ごとにコスト算出の方法が異なり、また、TDR では Global Design Effort による国際的な見積もりを利用しており、現時点での物価変動や為替変動を個々の要素に繰り込むのは容易ではないためである。

ここでは、研究開発の成否（ILC に適用できるかどうか）を評価する期間と費用を見積もっている。新しい技術を使った研究開発であるため、研究開発の成否だけでなく、成功した場合のコスト削減の効果についても不確定性があることには留意が必要である。結果として、想定していたコスト削減に至らない可能性もあるため、ここでは最大限のコスト削減効果を含めて幅を持って評価している。また、研究開発による削減効果には、研究開発に必要な費用を差し引くことは行っていない。

今回の研究開発として取り上げた項目は、いずれも世界中で研究開発が進められつつあるものである。グローバルな研究開発の中で日本国内で取り組む部分の期間と費用を提示している。実際のコスト削減研究開発の成功のためには国際的な協力が前提となっている。

多くの空洞や入力カプラを利用する超伝導加速器部分は、ILC に適用できる場合も、量産化について別途検討が必要である。ILC 建設の準備期間では、システムのプロトタイプを作って量産化を評価することが考えられており、今回の研究開発の費用には含まれていない。

大量生産においては、生産性の向上もコスト削減に大きく寄与する。TDR においては、ラーニングカーブなどにより大量生産の効果を取り込んでいるが、本調査研究においては具体的な大量生産によるコスト削減効果については調査の対象としていない。

1) 加速器本体（加速器土木を含む）の研究開発項目

（1） 現在コスト削減のための研究開発が進められているか、ほかの加速器プロジェクトで採用されつつある項目

下記のものは、すでに ILC コスト削減のために研究開発が進められているか、あるいはほかのプロジェクトで採用されつつある項目で、研究開発として短期的なスパンで結果を出すことが見込めるものである。

削減効果については、加速器土木を含む加速器本体の建設費用（TDR で 7,980 MILCU*、日本円換算で約 8,300 億円）に対するコスト削減の割合を示した。

*ILCU は 2012 年 1 月の米国ドルで定義される仮想通貨。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化	～3 年	1.3 億円	1.2～2.5%
高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)	～3 年	7.7 億円	2.7～5.5%
N-Infusion によるトンネル長の削減*			0～1.6%
N-Infusion 活用のための高周波系の研究開発	～4 年	3.7 億円	0.3～0.5%
入力カプラ	～5 年	0.4 億円	0.5～1%
電解研磨	～3 年	2.4 億円	1.3～2.6%

DR および RTML、BDS での 永久磁石の利用	～3 年	0.5 億円	消費電力最大 10.5 MW (偏向磁石) および 9.1 MW (四極磁石)の節約
-------------------------------	------	--------	---

*N-Infusion が成功した場合、空洞数は 10%削減されるが、アンジュレータ方式の陽電子生成の場合は、電子と陽電子を衝突させるタイミングをそろえるためにトンネルの長さに制約が入り、トンネル長は短くならない。その場合、削減効果は見込めない。

これらの研究開発項目は、たとえば、N-Infusion が成功した場合は空洞台数が減るため材料の費用や入力カプラの個数なども減少する。このため、最終的な成果は単純な足し算とならないことに注意が必要である。3～5 年で実現できる研究開発がすべて成功した場合は、前に述べたような重複効果を除くと、TDR (ILC 500 GeV) の場合、5～11%程度となる。

(2) 中長期的な研究開発課題 (10 年程度の研究開発期間を要するもの)

下記の二つの研究開発項目は、2015 年の ILC Progress Report^[I-2-1]にも記載されており、将来有望な研究開発項目であるが、実用化のためには、まだ 10 年程度のスパンの開発期間が必要と考えられる。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
超伝導薄膜	10～20 年	11.3 億円 (10 年)	10 年後で 2～4%
液圧成形	～10 年	3.2 億円	1～2%

(3) 加速器土木関係の研究開発項目

下記のうち、中央シールド壁厚変更、ヘリウム冷凍機配置変更、測定器ホールアクセスの最適化については、TDR 以降に LCC (Linear Collider Collaboration) 内で検討され ILC Progress Report^[I-2-1]に記載されている項目で、すでに概略については評価が行われているものである。削減効果については、加速器土木を含む加速器本体の建設費用 (TDR で 7,980 MILCU、日本円換算で約 8,300 億円) に対するコスト削減の割合を示した。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
中央シールド壁厚変更	机上検討 2 ヶ月	500 万円	1.5%程度
ヘリウム冷凍機配置変更	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.1%程度
測定器ホールアクセスの最適化	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.1%程度
加速器配置の最適化	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.2%程度

2) 測定器本体の研究開発項目

測定器本体については、「リターンヨークの鉄の量の削減」および「新しい超伝導線材の開発」がコスト削減の可能性がある項目として挙げられている。コスト削減に関する検討が ILC の LCC 内でも検討が始まったところであり、コスト削減の効果の評価についてはまだ見極められていない。

3) 超伝導加速以外の加速方式

今回、常伝導リニアコライダー (CLIC) およびプラズマ加速についても調査を行った。CLIC は ILC より高い衝突エネルギー (3 TeV) を最終ゴールとしており、まだ研究開発が必要な段階である。コスト的には誤差の範囲で ILC と同じと評価された。プラズマ加速については、コスト削減の効果は見通せなかったが、将来的に有望な加速器技術と考えられる。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発による削減効果
常伝導リニアコライダー	8 年 ^[I-2-2]	—
プラズマ加速	18～23 年 ^[I-2-3,4]	現在のところ、削減効果は見通せない。しかし、将来的に非常に有望な次世代加速器技術である。

参考文献

- [I-2-1] Linear Collider Collaboration, "The International Linear Collider Progress Report 2015", July, 2015.
- [I-2-2] Philip Burrows, "CLIC Accelerator Status and Optimisation", LCWS2017, https://agenda.linearcollider.org/event/7645/contributions/39681/attachments/32179/48789/LCWS_Oct2017.pdf
- [I-2-3] "Advanced Accelerator Development Strategy Report:DOE Advanced Accelerator Concepts Research Roadmap Workshop". <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1358081>
- [I-2-4] "Toward a Proposal for an Advanced Linear Collider". The Advanced and Novel Accelerators for High Energy Physics Roadmap Workshop (NAR2017). http://www.lpgp.u-psud.fr/icfaana/ANAR2017_report.pdf

II. 調査研究結果

1. ILC の概要

1) ILC の構成

ILC は、全長 30 km 超の電子・陽電子衝突型加速器である。図 II-1-1 にその概要を示す。ILC の加速器は、電子・陽電子源(e-/e+ source)、これらのビームのエミッタンス（ビームの広がりに対応する）を小さくするダンピングリング (Damping Ring)、ダンピングリングから主線形加速器までビームを輸送し、ビームバンチ長（軸方向の塊長さ）を圧縮するバンチコンプレッサー (bunch compressor) を含む RTML (Ring to Main Linac)、超伝導技術を用いてビームを加速する主線形加速器 (main linac) とビーム衝突点におけるビーム衝突の強度を示すルミノシティを高める為の最終的なビームの収束・調整を行うビーム供給・最終収束系 (BDS: Beam Delivery System) と衝突の反応を計測するための測定器 (detector) が設置される IR (Interaction Region) から構成されている。

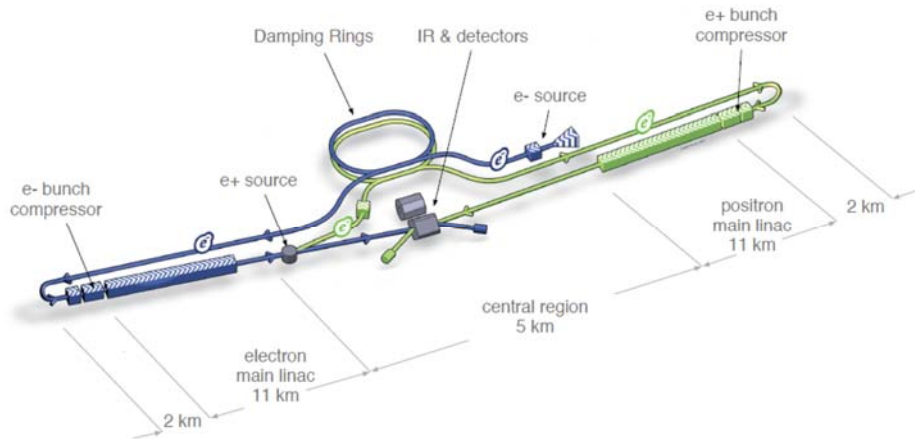


図 II-1-1 ILC の概略 (出典: ILC-TDR)

加速器は 1 秒間に 5 回の頻度 (5 Hz) でパルス運転される。パルス内には 1,312 個のビームバンチが形成され、電子源および陽電子源からは 1 バンチあたり 2×10^{10} 個の電子および陽電子が生成される。超伝導加速器部分では、合計 16,000 個程度のニオブ製の超伝導加速空洞が使用される。これら空洞はクライオモジュールと呼ばれる保冷容器に収められ、液体ヘリウムにより低温に保たれる。図 II-1-2 に超伝導加速空洞とクライオモジュールを示す。クライストロンと呼ばれる大電力増幅器から出力される大電力高周波は、入力カプラと呼ばれる部品を通じて空洞に投入され、1 空洞当たり平均 31.5 MV/m の電界を発生させる。一つのクライストロンの大電力高周波 (最大 10 MW) は 39 台の空洞に分配される。

加速器の運転パラメータを表 II-1-1 にまとめる。パルスで運転される加速器のパルス部分でのビーム電流は 5.8 mA で、ビーム電力は 10.5 MW、運転に必要な電力は 163 MW となる。最終収束点ではビームは高さ方向に 5.9 nm、横方向に 474 nm 程度に絞り、衝突実験が行われる。ルミノシティは $1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。

表 II-1-1 ILC の運転パラメータ (出典：ILC-TDR)

Centre-of-mass energy	E_{CM}	GeV	500
Collision rate	f_{rep}	Hz	5
Electron linac rate	f_{linac}	Hz	5
Number of bunches	n_b		1312
Bunch population	N	$\times 10^{10}$	2.0
Bunch separation	Δt_b	ns	554
Pulse current	I_{beam}	mA	5.8
Main linac average gradient	G_a	MV m ⁻¹	31.5
Average total beam power	P_{beam}	MW	10.5
Estimated AC power	P_{AC}	MW	163
RMS bunch length	σ_z	mm	0.3
Electron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.124
Positron RMS energy spread	$\Delta p/p$	%	0.070
Electron polarisation	P_-	%	80
Positron polarisation	P_+	%	30
Horizontal emittance	$\gamma\epsilon_x$	μm	10
Vertical emittance	$\gamma\epsilon_y$	nm	35
IP horizontal beta function	β_x^*	mm	11.0
IP vertical beta function	β_y^*	mm	0.48
IP RMS horizontal beam size	σ_x^*	nm	474
IP RMS vertical beam size	σ_y^*	nm	5.9
Luminosity	L	$\times 10^{34}$ cm ⁻² s ⁻¹	1.8
Fraction of luminosity in top 1%	$L_{0.01}/L$		58.3%
Average energy loss	δ_{BS}		4.5%
Number of pairs per bunch crossing	N_{pairs}	$\times 10^3$	139.0
Total pair energy per bunch crossing	E_{pairs}	TeV	344.1

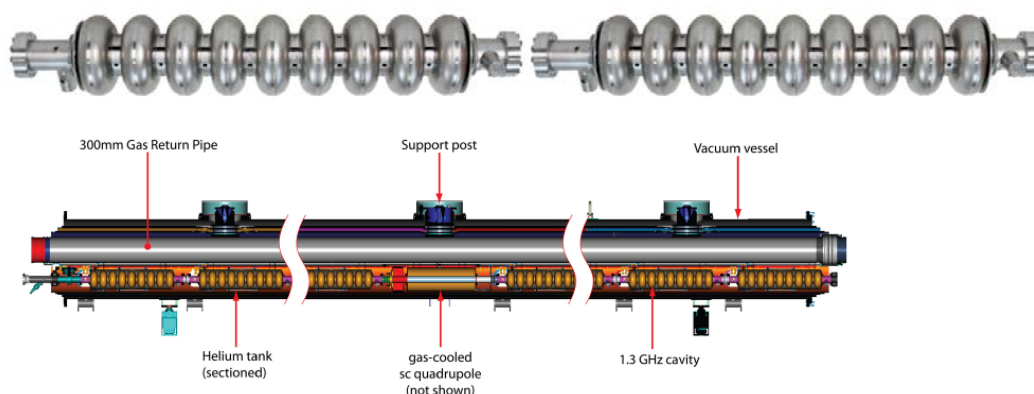


図 II-1-2 超伝導加速空洞とクライオモジュール (出典：ILC-TDR)

2 台の測定器 SiD (Silicon Detector) と ILD (International Large Detector) は、ILC の一つの衝突

点を共有して設置され、いわゆる“push and pull”方式で測定器を入れ替えることで2実験を実施する。図 II-1-3 に衝突点付近と二つの測定器の模式図を示す。

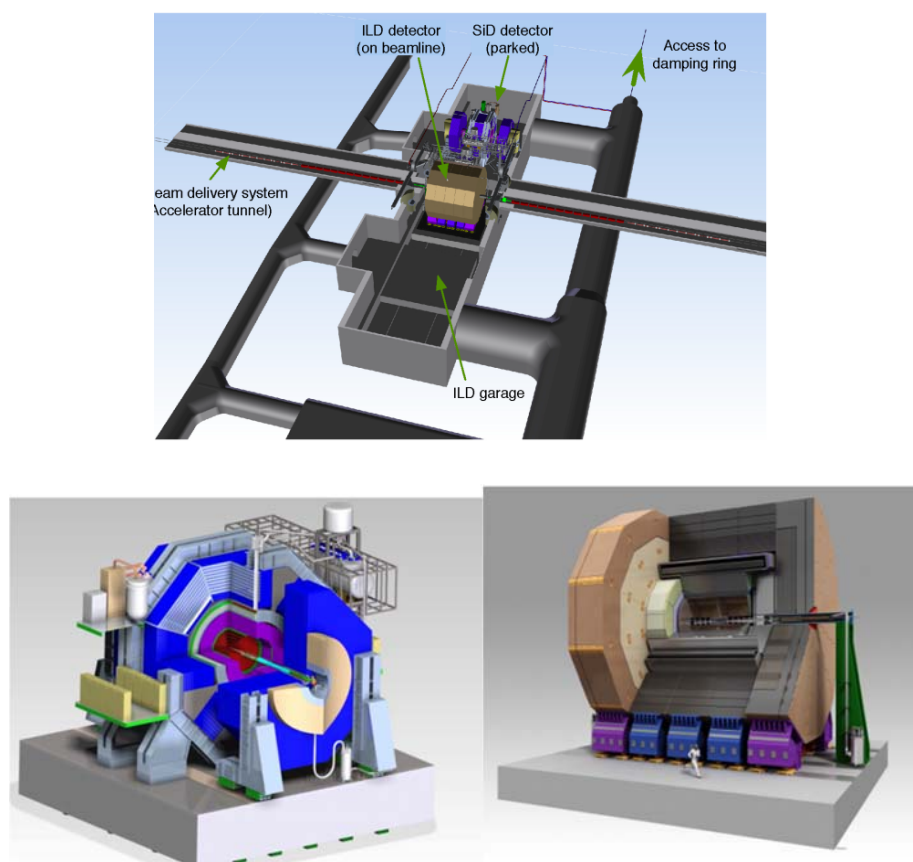


図 II-1-3 ILC 衝突点および検出器の概略（出典：ILC-TDR）

2) ILC 加速器本体の建設費用 (Value)

TDR での見積もりは物品費 (Value) と労務費 (Labor) に分けられ、TDR の Value のコスト見積もりは仮想通貨 ILCU を使って行われている。ILCU は 2012 年 1 月現在の購買力平価を基に 1 ILCU=1 米国ドルと定義されている。加速器建設コストは総額 7,980 MILCU であり、文部科学省の TDR 検証作業部会では、国際入札を考慮し 1 ユーロ 115 円、1 ドル 100 円と仮定して、8,309 億円とされている^[II-1-1]。

加速器の建設コストについて加速器施設ごとに分類したものを図 II-1-4 に示す。主線形加速器部分は合計 5,200 MILCU と、ILC 加速器全体の 2/3 程度を占めていることがわかる。ここで、Common はメインキャンパス（敷地面積：500,000 m²、建屋延床面積：45,500 m²を想定している）や主電力受電部分、一般的なネットワークおよびコンピュータシステム（電子メールなど）、加速器制御などを含んでいる。衝突点 (IR) に設置される測定器は、別途、物理測定器のコストとして分類され、ここでは測定装置を設置するための実験ホールのコストが含まれている。

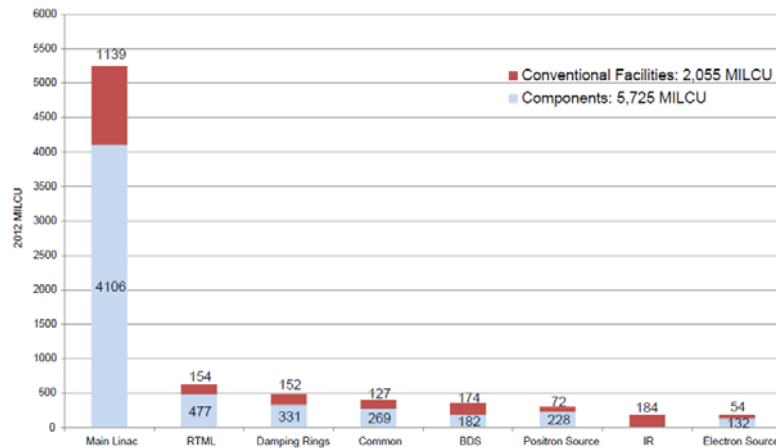


Figure 15.8. Distribution of the ILC value estimate by system and common infrastructure, in ILC Units. The numbers give the TDR estimate for each system in MILCU.

図 II-1-4 ILC の加速器施設毎の建設コスト（出典：ILC-TDR）

加速器の建設コストを要素ごとに分けたものを図 II-1-5 に示す。Cavities and Cryomodules は 35% を占める。これは、超伝導加速器の空洞とそれを低温に保つクライオモジュールなどのコストで、超伝導加速空洞及びクライオモジュールは主線形加速器以外に、電子及び陽電子源、RTML などで使用されている。L-band High Level RF は、10% のコストを占め、超伝導加速器に必要な高周波源（クライストロン）と高周波伝送系などから構成される。CFS（Conventional Facilities and Siting）は加速器トンネルや建屋などの建築土木部分(CFS-civil)と電力や冷却水などのユーティリティからなる。Cryogenics は超伝導加速器を冷却する冷凍機などからなり、8% を占める。Magnets and Power Supplies は電磁石とその電源からなり、6% を占める。

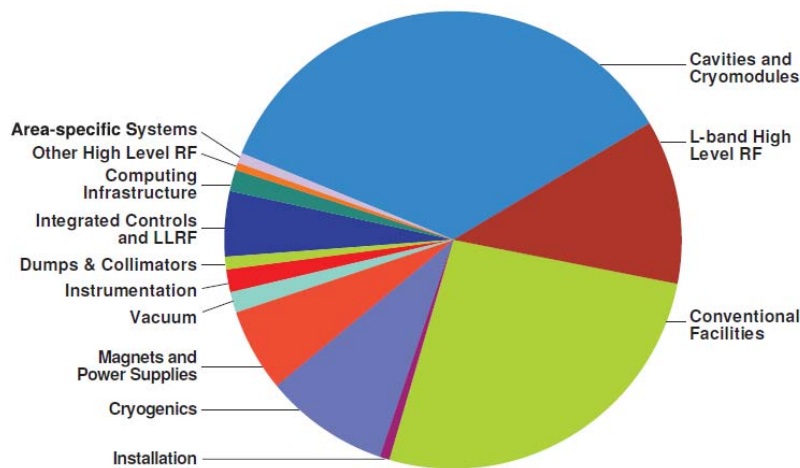


図 II-1-5 ILC の加速器要素毎の建設コスト（出典：ILC-TDR）

3) ILC 加速器の労務費（Labor）

加速器建設コストについて加速器施設ごとに分類したものを図 II-1-6 に示す。労務費は千人・時の単位で記載されている。各加速器システムコンポーネントの Labor 見積には、システムの搬入/設置、加速器コンポーネントの検収、システムインテグレーションに関わるスタッフ等が、Common には、計算

インフラ、研究所管理などの労務が含まれる。全体の約 37%を主線形加速器が占め、続いて 31%を「共通」が占めている。

これらの労務費のタイムプロファイルを図 II-1-7（搬入設置を除く）に示す。プロファイルは人員単位（FTE）で示しており、年間の作業を 1,700 時間と仮定している。労務の所要人員は 5 年目にピークを迎え、ピーク時は約 1,600 FTE である。搬入/設置のタイムプロファイルを図 II-1-8 に示す。搬入/設置は、7 年目にピークを迎え、約 950 FTE である。

加速器建設にかかわるこれらの労務費は、文部科学省の TDR 検証作業部会では、1,598 億円とされている^[II-1-1]。



図 II-1-6 ILC の加速器要素毎の労務費（出典：ILC-TDR）

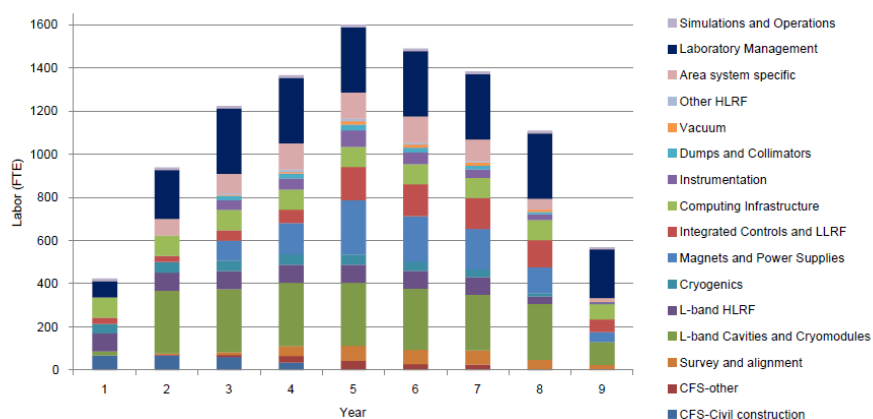


図 II-1-7 ILC 加速器労務費のタイムプロファイル（搬入・設置を除く）（出典：ILC-TDR）

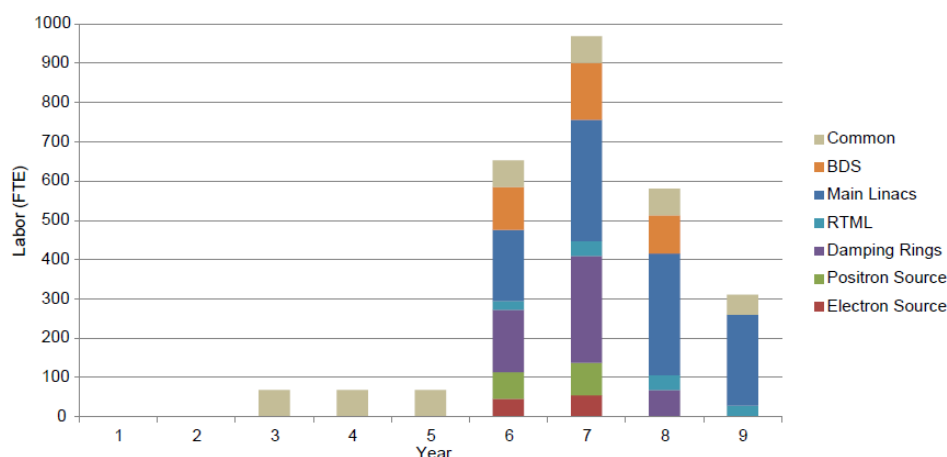


図 II-1-8 ILC 加速器搬入・設置労務費のタイムプロファイル（出典：ILC-TDR）

4) ILC における電力使用量

ILC で想定している電力使用量を表 II-1-2 にまとめる。単位は MW で、164 MW の使用を想定しており、そのうち 106 MW が主線形加速器（Main Linac）となっている。また要素別では、高周波源が最も大きく 68 MW である。

表 II-1-2 ILC での電力使用量（出典：ILC-TDR）

Accelerator section	RF Power	Racks	NC magnets	Cryo	Conventional		Total
					Normal	Emergency	
e ⁻ sources	1.28	0.09	0.73	0.80	1.47	0.50	4.87
e ⁺ sources	1.39	0.09	4.94	0.59	1.83	0.48	9.32
DR	8.67		2.97	1.45	1.93	0.70	15.72
RTML	4.76	0.32	1.26		1.19	0.87	8.40
Main Linac	52.13	4.66	0.91	32.00	12.10	4.30	106.10
BDS			10.43	0.41	1.34	0.20	12.38
Dumps					0.00	1.21	1.21
IR			1.16	2.65	0.90	0.96	5.67
TOTALS	68.2	5.2	22.4	37.9	20.8	9.2	164

5) ILC 測定器の建設費

ILC では先に述べたように、ILD と SiD という二つの測定器を置く予定である。TDR(Vol.4 Detectors)によれば、ILD のコストは 391.8 MILCU、SiD のコストは\$315 M で、労務は、ILD が 1,400 人年、SiD が 748 人年となっている。文部科学省の TDR 検証作業部会では、測定器本体の建設コスト 766 億円、労務費 239 億円とされている [II-1-1]。

参考文献

[II-1-1] 文部科学省国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議（第 3 回） 配付資料 資料 1-2
技術設計報告書（TDR）検証作業部会報告

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/038/shiryo/1357375.htm

2. 電子・陽電子源

1) 電子源

ILC では、バンチ電荷 3.2 nC、バンチ数 1,312、バンチ内繰り返し 1.8 MHz、バンチトレイン繰り返し 5 Hz、偏極度 80%の偏極電子ビームが要求される。電子ビームのパラメータは表 II-2-1 に示す。

表 II-2-1 ILC 電子ビームのパラメータ（出典：ILC-TDR）

Parameter	Symbol	Value	Units
Electrons per bunch (at gun exit)	N_-	3×10^{10}	Number
Electrons per bunch (at DR injection)	N_-	2×10^{10}	Number
Number of bunches	n_b	1312	Number
Bunch repetition rate	f_b	1.8	MHz
Bunch train repetition rate	f_{rep}	5 (10)	Hz
FW Bunch length at source	Δt	1	ns
Peak current in bunch at source	I_{avg}	3.2	A
Energy stability	σ_E/E	<5	% rms
Polarization	P_e	80 (min)	%
Photocathode Quantum Efficiency	QE	0.5	%
Drive laser wavelength	λ	790±20 (tunable)	nm
Single bunch laser energy	u_b	5	μJ

この電子ビームを生成するためのビームラインの構成を図 II-2-1 に示す。直流（DC）電子銃で生成した電子ビームは、325 MHz のサブハーモニックバンチャー（SHB）およびソレノイド磁場中にある L-band 常伝導進行波型加速管により、バンチ長が 1 ns から 20 ps に圧縮されるとともに 76 MeV まで加速される。その後、超伝導線形加速器で 5 GeV まで加速、スピンローテーターで垂直方向のスピンの変換され、ダンピングリングに入射される。超伝導線形加速器には、加速管を収めた 24 台のクライオモジュールが設置される。DC 電子銃とレーザーシステムは、それぞれ 2 組で構成して冗長性を持たせている。

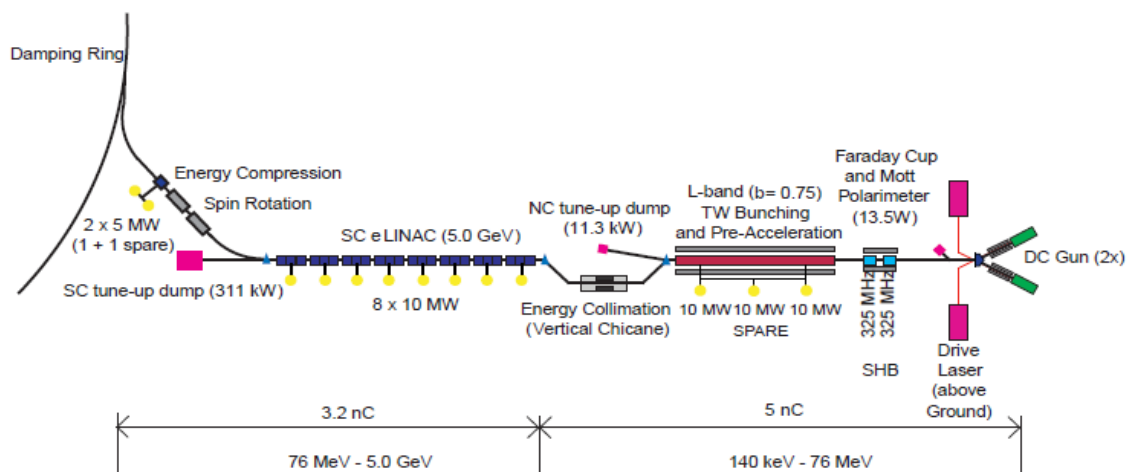


図 II-2-1 電子源ビームライン概念図（出典：ILC-TDR）

ILC では偏極電子ビームを用いるため、DC 電子銃には GaAs/GaAsP（ガリウム砒素/ガリウム砒素リン）歪み超格子薄膜カソードを使用する（図 II-2-2）。表面 GaAsP 層の P を増やすことにより、表面電

荷制限を抑制し、量子効率（0.5%）、高い偏極度（85%）の電子ビームを生成できる。TDR 後には GaAs/GaAsP 歪み補償超格子薄膜カソードの開発が進み、偏極度 92%、量子効率 1.6%が達成されている [II-2-1]。これらの高量子効率と高偏極度を同時に得るためには、バンドギャップとレーザー波長を合わせる必要があり、790nm 付近で波長可変な電子生成用レーザーが必要となる。このため 700-1,100 nm という広い波長帯域を持つ Ti:Sapphire 結晶を用いたレーザーを使用する。

コストを下げるために、2 系統用意している DC 電子銃およびそのレーザーシステムを 1 系統とすることや、電子銃からのビームのバンチ長を 20 ps にすることで SHB を取り除くことが考えられる。DC 電子銃にパルス長 20 ps のレーザーを入射しても、加速電圧が低く空間電荷効果に制限されて必要なバンチ電荷が得られない。そこで RF 電子銃の利用が考えられるが、高周波電界による NEA（Negative Electron Affinity）表面の破壊が起こるため使用することはできない。

電子源において、新技術によるコスト削減の候補は見当たらない。

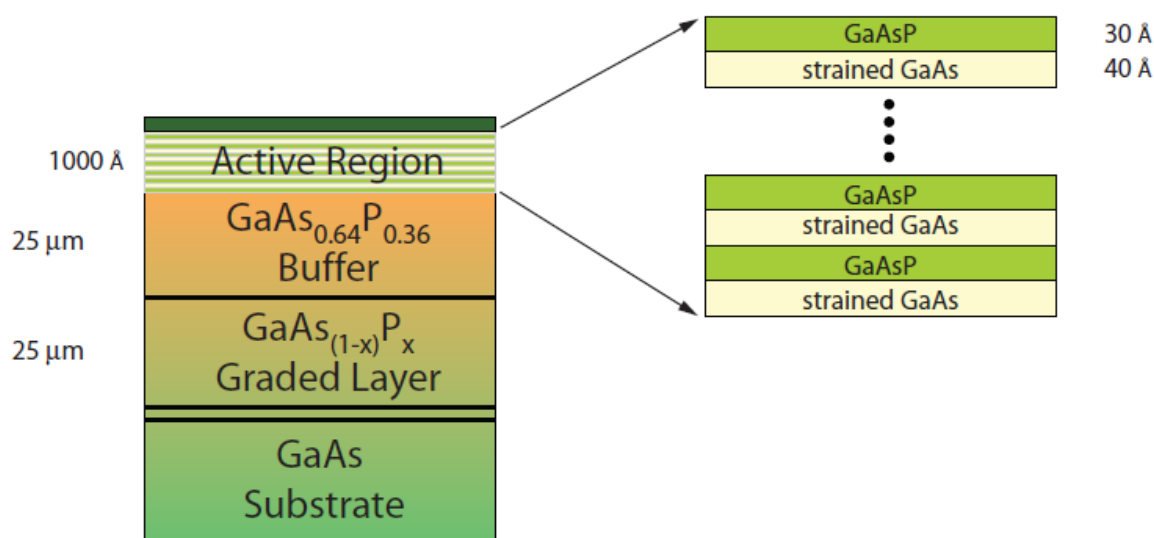


図 II-2-2 GaAs/GaAsP 歪み超格子薄膜カソードの構造（出典：ILC-TDR）

2) 陽電子源

ILC における陽電子ビームのパラメータを表 II-2-2 に示す。

表 II-2-2 ILC 陽電子ビームのパラメータ (出典: ILC-TDR)

Parameter	units	350 GeV	500 GeV
Electron beam energy (e^+ prod.)	GeV	178	253
Bunches per pulse	N	1312	1312
Photon energy (first harmonic)	MeV	16.2	42.8
Photon opening angle ($=1/\gamma$)	μrad	2.9	2
Undulator length	m	147	147
Required undulator field	T	0.698	0.42
undulator period length	cm	1.15	1.15
undulator K		0.75	0.45
Electron energy loss in undulator	GeV	2.6	2
Induced energy spread (assume 0% initial)	%	0.122	0.084
Emittance growth	nm	-0.55	-0.31
Average photon power on target	kW	54.7	41.7
Incident photon energy per bunch	J	8.1	6
Energy deposition per bunch (e^+ prod.)	J	0.59	0.31
Relative energy deposition in target	%	7.20%	5%
Photon rms spot size on target	mm	1.2	0.8
Peak energy density in target	J/ cm^3	295.3	304.3
	J/ g	65.6	67.5
Pol. of Captured Positron beam	%	30	30 [†]

[†] Flux concentrator needs to operate at a stronger field.

ILC では、バンチ電荷 3.2 nC、バンチ数 1,312、バンチ内繰り返し 1.8 MHz、バンチトレイン繰り返し 5 Hz の陽電子ビームが要求される。陽電子源は、アンジュレータ方式をベースライン、電子駆動方式をバックアップとした二つの方式が検討されている。ビーム偏極は、アンジュレータ方式の場合で偏極度 30%、電子駆動方式では無偏極となる。

(1) アンジュレータ方式

アンジュレータ方式の陽電子源のレイアウトを図 II-2-3 に示す。TDR では、重心系エネルギー 250 GeV (電子エネルギー 125 GeV) の場合に陽電子生成率が不足するため、電子線形加速器の 10 Hz 運転を採用している。これは電子線形加速器を陽電子生成用の 150 GeV と衝突実験用の 125 GeV を交互に 5 Hz ずつで運転することにより、陽電子の不足を解決する方法である。

アンジュレータ方式の場合は、電子源に同期したタイミングで陽電子が生成されるため、衝突点で電子と陽電子を衝突させるための制約が生じる^[II-2-2]。図 II-2-4 にタイミング制約に関する模式図を示す。衝突条件を満たすためには、陽電子の加速部の長さを調整する必要がある。すなわち、超伝導加速空洞の加速電界が 10% 程度向上した場合も、このタイミング制約のために陽電子の加速される距離は変わらないためトンネル長を短くすることはできない。空洞電界が向上した場合も、主線形加速器部分のトンネル長は保たれたままとなっている (ここではダンピングリングの周長は TDR から変化させないと仮定しているが、これを変更することでタイミング制約を満たす可能性も残っている)。

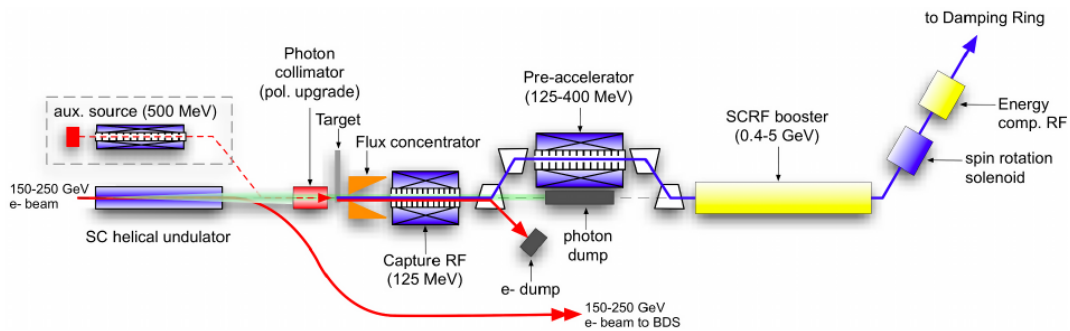


図 II-2-3 アンジュレータ方式の陽電子源ビームライン概念図 (出典: ILC-TDR)

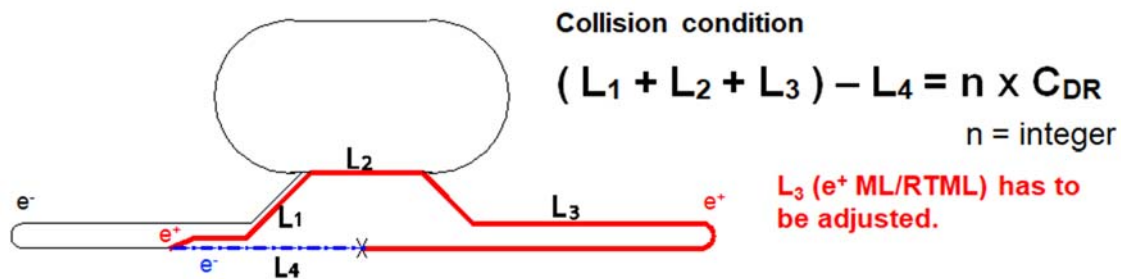


図 II-2-4 アンジュレータ方式の衝突タイミングにかかる制限 (出典: 文献 II-2-2)

アンジュレータ方式に関してはいくつかの技術的課題がある。

まず、TDR では、標的は Ti 合金であり、ビームパルス長 0.7 msec の間の熱負荷を緩和するために水冷回転標的を採用しているが、真空中の水冷回転標的の試作には成功していない。そこで、水冷でなく輻射冷却による回転標的を研究している。これにより真空の問題は緩和されるが、熱・応力を含む十分な設計には至っていない。放射状に分割した一片による試験の計画が提案されている。標的車輪の重量は 100 kg 前後になる見込みである。これを真空中で支えるには磁気浮上技術を用いる。これについてはさまざまな方面での実例があり適用可能と考えられるが、詳細設計が必要である。

第2の問題は、標的のあとの陽電子捕獲部分について、TDR ではピーク磁場 3 T の Flux Concentrator によるパルスソレノイド磁場を採用している。しかし、ビームパルス長 0.7 msec の間の磁場の時間変化が避けられない (図 II-2-5)。これは skin depth の周波数依存性によるもので、パルス内のバンチ位置によるバンチ強度の変動をもたらす。さらに、125 GeV の電子ビームの場合、標的中でのシャワーの広がりが大きく、Flux Concentrator の口径 (半径 6.5 mm) 先端での energy deposit の大きいことも指摘されている。そこで、Flux Concentrator を、ピーク磁場 1 T、口径 1 cm 程度の QWT (Quarter Wave Transformer) (直流あるいはパルス) に置き換えることを検討している。当初、陽電子収量が (電子 1 個に対し) 1 以下になると見られていたが、最新のシミュレーションでは 1.3 程度が確保できる見通しになった。これにより energy deposit の問題もなくなる。今後 QWT の詳細設計を行う必要がある。

第3に、標的での energy deposit の詳細である。とくにアンジュレータを延長するので、これによる energy deposit の増加は大きい。TDR では厚さ 14 mm (0.4 輻射長) のチタン合金を採用しており、これは 250 GeV 電子ビームに最適化されている。

第4の問題は、Photon Dump である。TDR は main dump を縮小した加圧水冷方式を採用している。最大 energy deposit power は、14 MW の main dump にくらべてはるかに低い 300 kW であるが、Photon Dump の場合 photon beam を振ることができないので、窓 (厚さ 1 mm のチタン) に対

する DPA (Dislocation Per Atom)による寿命の問題が指摘されている。これに代わるものとして、角度をつけたグラファイト標的を 1・2 km の位置に置く方式が有力になっているが、グラファイトと銅の接着を含めた詳細な設計を行う必要がある。

アンジュレータ方式の陽電子生成は、偏極ビームが得られる利点はあるが、総合的に考えて、技術的現実性に関して現在の段階では十分とはいえない。いままじの研究が必要である。

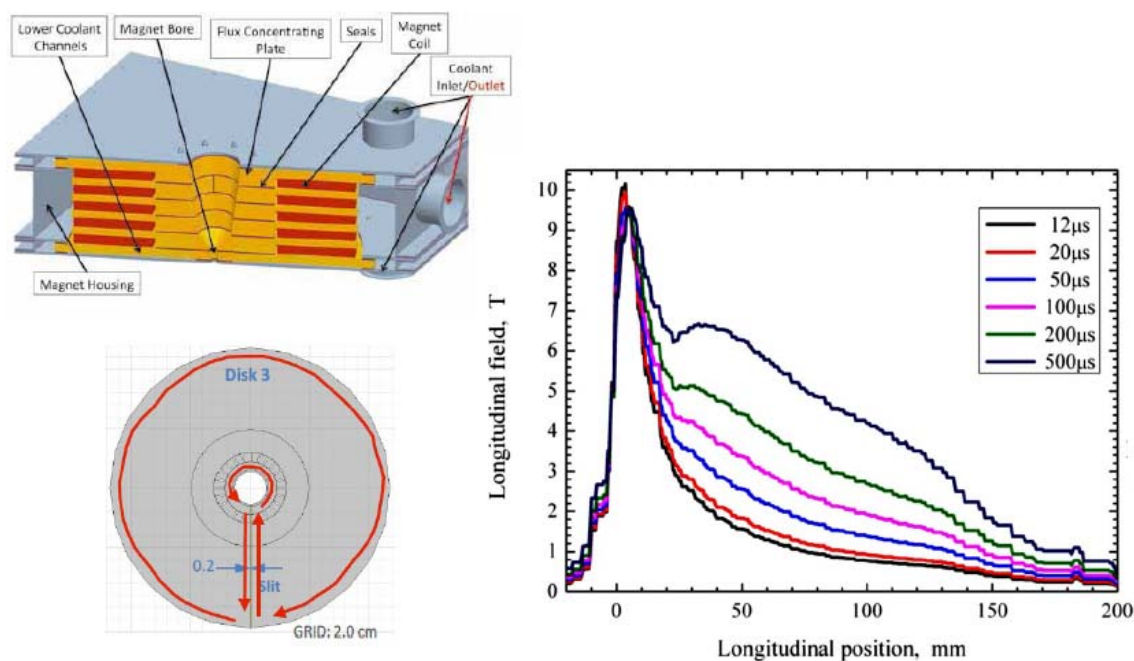


図 II-2-5 アンジュレータ方式での Flux Concentrator (出典:文献 II-2-3)

(2) 電子駆動方式

アンジュレータ方式のバックアップとして検討している電子駆動方式陽電子源のレイアウトを図 II-2-6 に示す。この方式では、3 GeV の電子ビームを WRe ターゲットに入射し、電磁シャワーによる制動放射ガンマ線からの電子・陽電子対生成により陽電子ビームを生成する。この陽電子ビームを Adiabatic Matching Device (AMD) で平行ビームに近づけ、ソレノイド磁場中の捕獲用加速管により 250 MeV まで加速する。シケインで電子ビームと陽電子ビームを分離し、電子ビームはビームダンプへ、陽電子ビームは L-band および S-band の常伝導加速管を用いて 5 GeV に加速する。最後に ECS (Energy Compressor) により陽電子ビームのエネルギー広がり圧縮してダンピングリングに入射する。

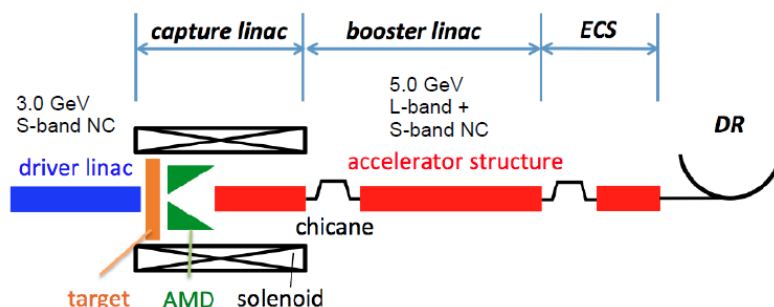


図 II-2-6 電子駆動方式の陽電子源ビームライン概念図（出典：文献 II-2-3）

電子駆動方式も、高い熱負荷のために回転式の標的を採用する。ただし、ILC のビーム（バンチ列）構造として 0.7 ms の電子ビームを標的に入射すると熱負荷が非常に大きくなる問題がある。そのため、 300 Hz の高繰り返しではあるが、標的へのパルスあたりの入射バンチ数を 66 に抑える。生成された 66 個の陽電子バンチは、 300 Hz で順次ダンピングリングに入射蓄積され、最終的にダンピングリングにおいて ILC のビーム構造が実現される。

陽電子捕獲部およびブースター部の前半は L-band 加速管、ブースター部の後半は S-band の常伝導加速管で構成される。これらの加速管においてはビームローディングが強く、これを補正するために加速電界が制限されている。RF パワーは 162 台の L-band 50 MW および 92 台 S-band 80 MW クライストロンにより供給され、1 台のクライストロンで 2 台の加速管を駆動する。

コスト削減の方法として、RF pulse compressor により RF パワーを上げることが考えられる。RF ユニット 1 台で駆動できる加速管数が増えるため、RF ユニット当たりのコストは上昇するが、加速管の総数を抑制することができるので、コスト削減の可能性はある。RF pulse compressor の技術は既に存在しており、これらはシステムの最適化と言える。新技術と言う視点ではコスト削減の候補とはならない。

参考文献

- [II-2-1] Xiuguang Jin, et.al., “Effect of crystal quality on performance of spin-polarized photocathode”, Appl. Phys. Lett , 105(20):203509, 2014.
- [II-2-2] Linear Collider Collaboration,” The International Linear Collider Progress Report 2015”, July, 2015.
<https://cds.cern.ch/record/2059240/files/CERN-ACC-2015-0131.pdf>
- [II-2-3] M. Kuriki, “Possible Cost Reduction on Sources”, LCWS2017,
<https://agenda.linearcollider.org/event/7645/sessions/4532/#20171025>

3. ダンピングリングおよびRTML (Ring to Main Linac)

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

(1) ダンピングリング

ダンピングリングは、電子源および陽電子源からのビームを、衝突点での極小ビーム実現に必要な低エミッタンスビームに変換する必須の装置である。ビームエネルギーは 5 GeV、周長は 3 km であり、554 nsec 間隔の入射バンチ列 (1,312 バンチ) を、6 nsec 間隔に圧縮して蓄積し、再び 554 nsec 間隔のバンチ列として取り出す。図 II-3-1 にリングの構成を示す。レーストラックの形をしたリングの直線部には、ウィグラー電磁石、高周波加速空洞、位相調整トロンプーン、周長調整シケイン、入射取り出しシステムが設置される。アーク部は、3 m の偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石、および軌道調整用ステアリング電磁石からなる 150 個の基本セルから構成される (図 II-3-2)。

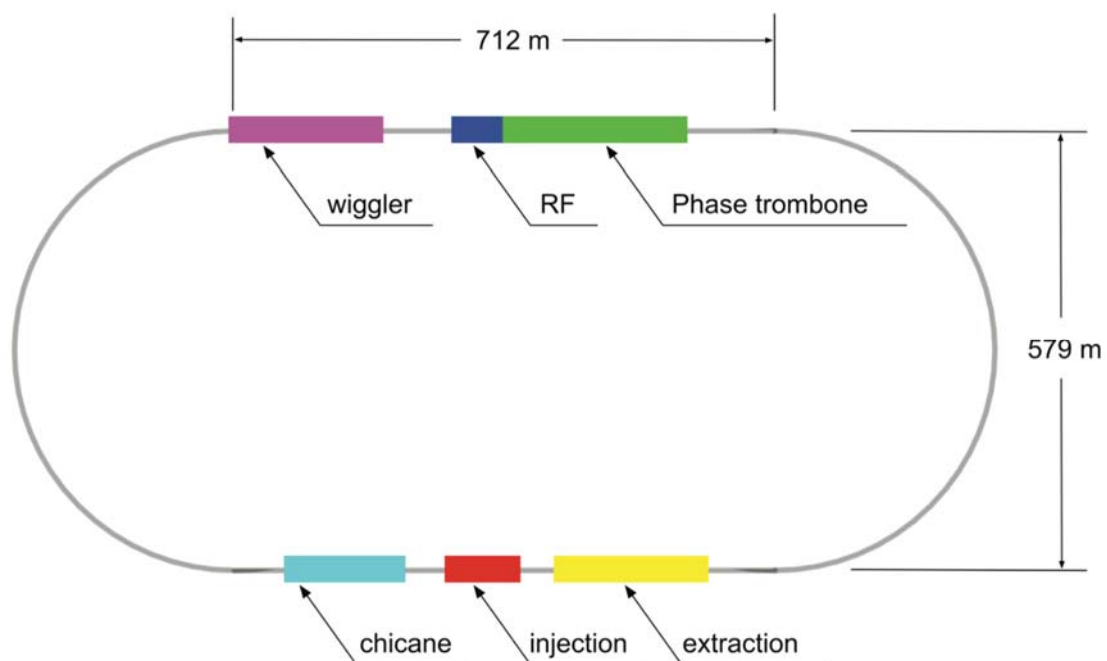


図 II-3-1 ダンピングリング構成 (出典：ILC-TDR)

ダンピングリングは、電子ビーム、陽電子ビーム、それぞれに1台ずつ用意され、同じトンネルに上下2段重ねて設置される。将来のILC高度化オプションの一つであるルミノシティアップグレードでは、バンチ数が2倍に増えバンチ間隔が3 nsに半減する。陽電子リングにおける電子雲不安定性の影響が懸念されるが、TDR時の見積もりでは、想定する陽電子リングで対応可能と評価されている。しかしながら、この影響が想定よりも大きかった場合に後からトンネルを拡張して大きなリングとすることはできないため、更にもう1台の陽電子リングを追加し、上下に3段のリングを重ねることが可能な空間を確保した設計としている (図II-3-3)。電子、陽電子双方のリングにおける蓄積周回ビームおよび取り出しビームのバンチ構造は同じである。

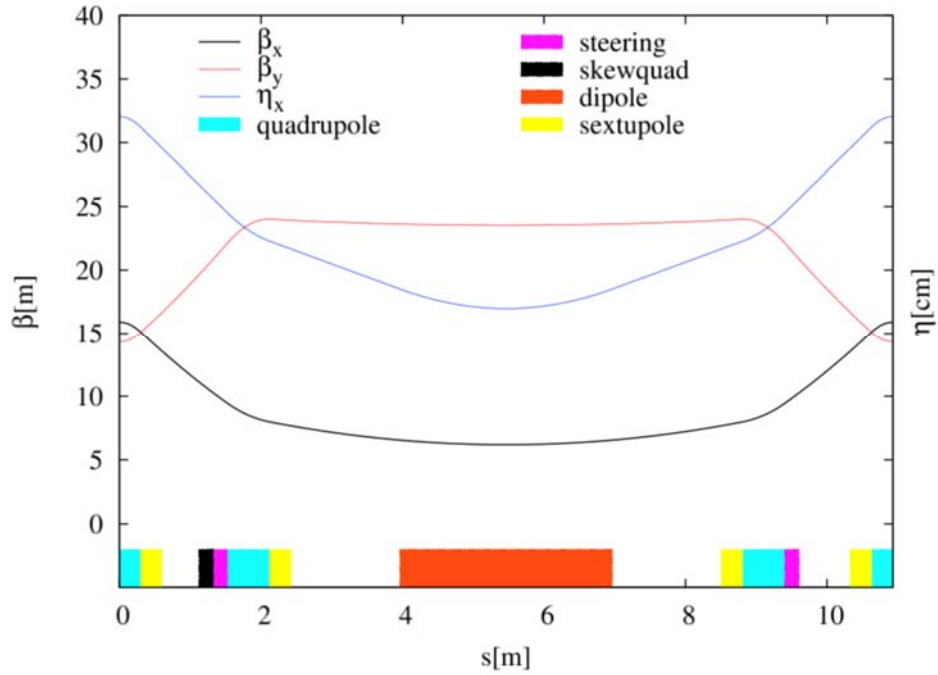


図 II-3-2 アーク部セル構造（出典：ILC-TDR）

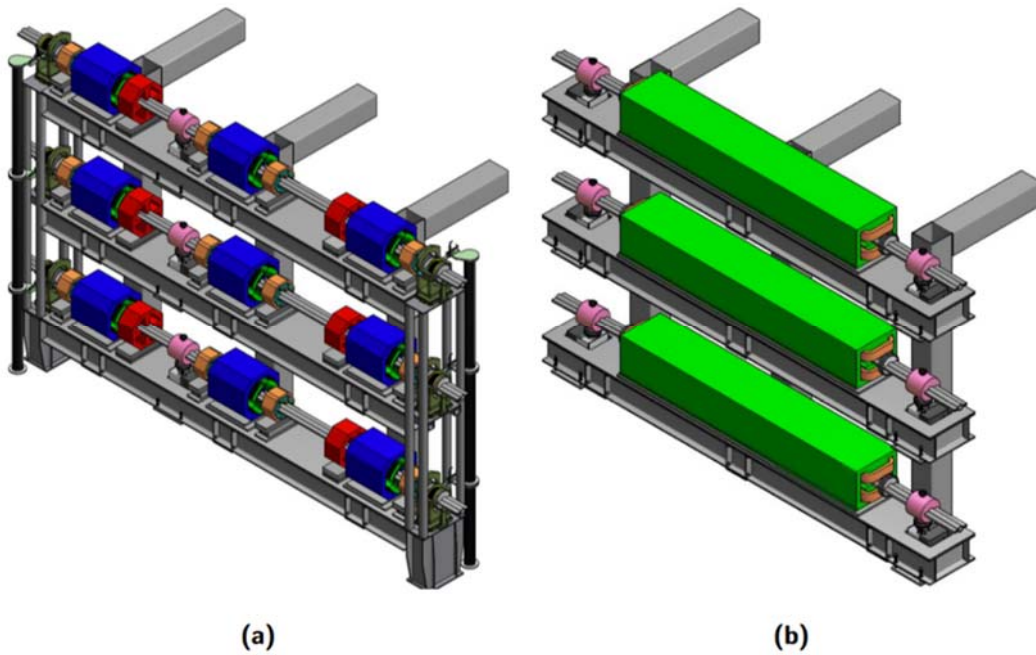


図 II-3-3 3 段リングにおけるアーク部電磁石の配置。
(a) 四極六極電磁石部 (b) 偏向電磁石部（出典：ILC-TDR）

(2) RTML (Ring to Main Linac)

RTML (Ring to Main Linac) は、ダンピングリング出口から主線形加速器入口までのビームラインである。電子側 RTML の主要な構成を図 II-3-4 に示す。主線形加速器を逆向きに走る長い低エミッタンスビーム輸送路 (ELTL)、周回部 (ETURN)、スピンローテーター (ESPIN)、および 2 段のバンチ圧縮機 (EBC1、EBC2) から構成され、陽電子側 RTML も同様の構成となる。RTML では ETURN の行きと帰りを利用したビーム軌道安定化 (フィードフォワード) が設置される。バンチ圧縮機は衝突ビー

ムとして最適なバンチ長に変換する役割を担い、入射のエネルギーとバンチ長がそれぞれ 5 GeV、6.0 mm であるものを、EBC1 において 4.8 GeV、0.9 mm に圧縮し、更に EBC2 で 14.8 GeV、0.3 mm に圧縮する。上下 3 段のダンピングリング、主線形加速器との配置から生じるビームラインの高さの違い（図 II-3-5）があり、これを RTML が吸収している。

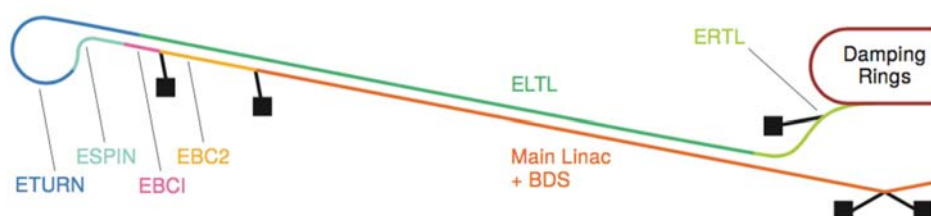


図 II-3-4 RTML の概要（出典：ILC-TDR）

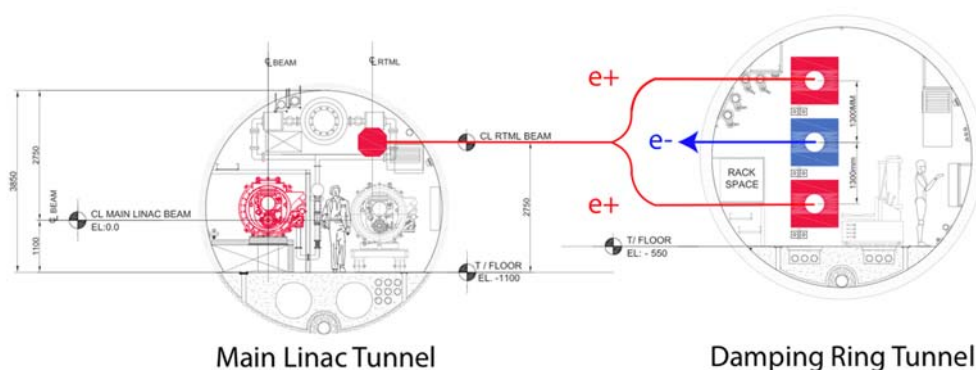


図 II-3-5 DR、RTML および主線形加速器の垂直位置（出典：ILC-TDR）

2) コスト削減に関する検討

ダンピングリングは、現在に至るまでに円形加速器や放射光リングで培われてきた長い経験に基づく要素技術を基に設計されている。ILC-DR において、それぞれの要素技術がコストに占める割合は、電磁石系 44%、真空系 20%、超伝導冷凍機系 8%、高周波系 8%、制御系 7%、ビーム診断系 6%、その他 7% となっている。この中で新技術によるコスト削減の可能性を有するものは、電磁石系と真空系である。

真空系の主要な部分は真空ポンプと真空チェンバーである。真空ポンプ系は技術的に成熟しており、コスト削減の対象は真空チェンバー系である。ダンピングリングの設計においては、イオンや電子雲などに起因するビーム不安定性への対策が進められた。KEKB や米国コーネル大学の CESR-TA で実施された電子雲不安定性のビームによる評価実験の成果を基にした真空チェンバーの設計が行われており（図 II-3-6）、同様の設計は現在運転を始めようとしている SuperKEKB にも採用されている。このように真空系は既に最新の技術を取り込んで設計されており、更なる新技術によるコスト低減の可能性は少ない。

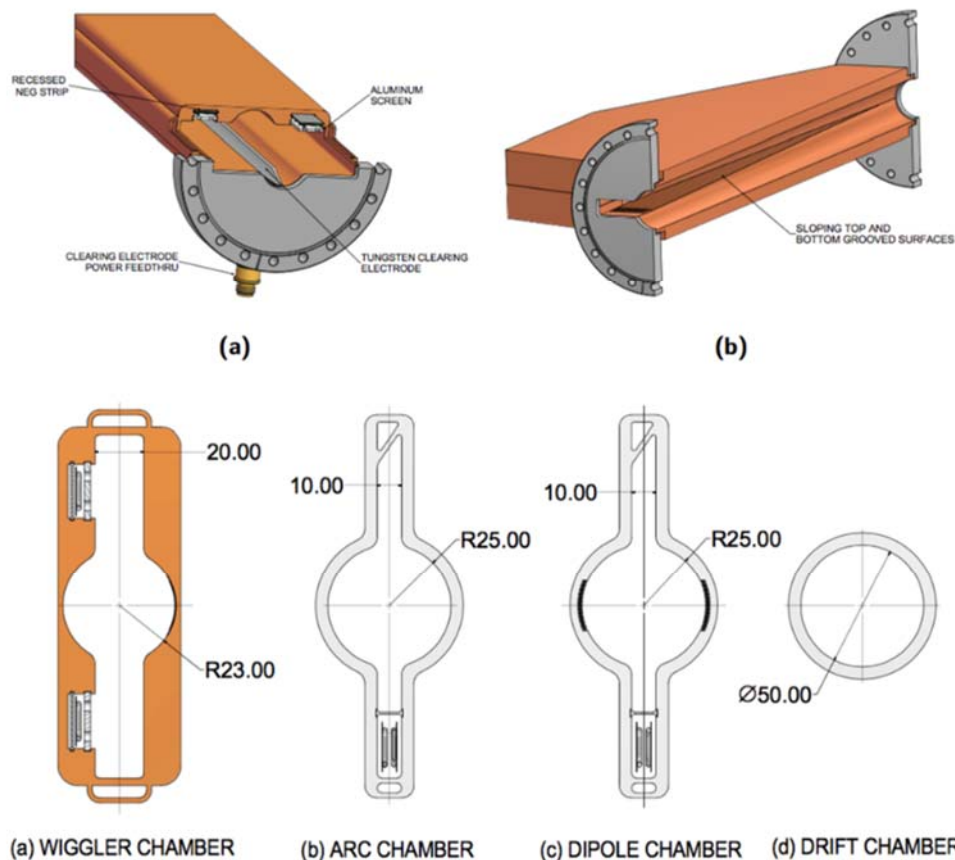


図 11-3-6 電子雲不安定性の対策を考慮した真空チェンバー（出典：ILC-TDR）

ビーム加速器に利用される磁石には、電磁石と永久磁石がある。TDR 作成当時、大規模な加速器の主要な磁石に永久磁石を使用した例は無く、放射光施設におけるアンジュレータなど特殊な装置で利用されるに留まっていた。そのため、ILC ダンピングリングは従来方式である電磁石を基に設計されている。TDR（2013 年）の頃から、欧州シンクロトロン放射光施設（ESRF: European Synchrotron Radiation Facility）や SPring-8 などの幾つかの放射光施設において、低エミッタンス化による高輝度化計画が立ち上がった^{[II-3-1][II-3-2]}。ここでは磁場の安定性に加え、消費電力の削減が大きな課題となり、リングを構成する主要な磁石として永久磁石を利用する検討が進められることとなった。

永久磁石の利用では以下のメリットが挙げられる。

- 電磁石コイルの冷却水、DC 電源、電磁石と DC 電源を結ぶ大電流 DC ケーブルが不要となり、建設時の作業が大幅に省略できる。
- 運転時の電力消費がほとんど無く、電源室のスペースや熱負荷、冷却水システムの負荷が下がり、運転コストを削減できる。また、電源故障や水漏れ事故などのリスクも下がり、保守費用を削減できる。

一方、作業時に通電を止めることのできる電磁石とは異なり、永久磁石では常に強い磁場が存在する。そのため、

- 強磁場における作業の安全に十分注意する必要がある。

また、アンジュレータなどの挿入光源での永久磁石の経験から、

- 磁場強度に温度依存性が生じる。
- 放射線照射によるダメージで磁場強度が劣化する。

などの対策が必要であることが指摘されている。これらについて、リングやビームラインを構成する磁石では、取り付け空間の狭い挿入光源とは異なり、整磁合金を磁気回路のシャントに用いて温度変化を補償すること、放射線量と劣化の評価が進んだことを基に問題の少ない位置に永久磁石ブロックを配置する、などの対策により問題を軽減できることが確認されている。

このような背景の下で、永久磁石を用いた偏向磁石や四極磁石のプロトタイプ開発が進められている。特に放射光リングの高度化計画では、水平方向の低エミッタンス化のために、偏向磁石の磁場を弱くすると共に段階的に強度を変えるビーム光学方式が見いだされ、結果として台数が増えることになり、運転コストを抑えた設計が強く求められた。その中で、ESRF の高度化計画(ESRF-EBS)が承認され、2015 年から本格的に磁石の製造が開始された。この計画では、偏向磁石をアーク部セルあたり 2 台の電磁石から 4 台の永久磁石にする設計が採用され、2017 年 5 月にはリングで必要とする偏向磁石 128 台中 47 台の組み立てが完了している（図 II-3-7）。永久磁石を本格的に採用する大型加速器として注目される。



図 II-3-7 5 連の永久磁石ユニットからなる ESRF-EBS の偏向磁石
(出典：文献 II-3-3)

ESRF-EBS の偏向磁石は、ビーム進行方向に対して段階的に磁場強度を変えた 5 連の磁石ユニットからなるが、ユニットの磁場強度としては固定である。一方、ある程度の磁場強度可変性を持たせた偏向磁石の試作も進められている（図 II-3-8）。これは磁気回路を形成するブロックの一部をスライドさせるなどして、磁場フラックスの一部を別系統に迂回させ、本来の磁気回路であるビームライン上を流れるフラックスを変化させるものである。これにより、永久磁石の個体差や放射線ダメージによる劣化に対する調整が可能となる。

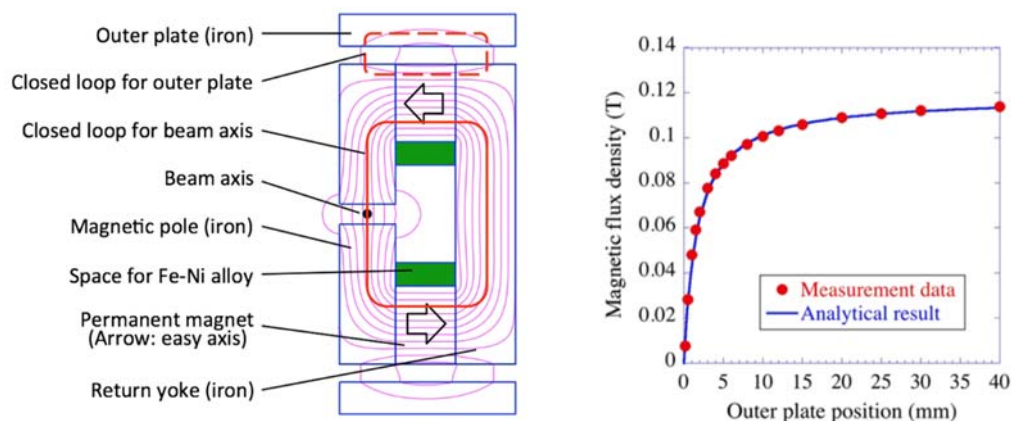


図 II-3-8 可変式偏向磁石 SPring-8-II 試作機 (出典：文献 II-3-4)

永久磁石による四極磁石の開発も進められている。磁気回路のフラックスを変化させることで磁場強度を変える原理は前述の偏向磁石と同じであるが、様々な機械的機構が考案され、回転型^{II-3-5}^{II-3-6}、垂直移動型^{II-3-7}などが試験されている(図 II-3-9)。いずれの場合も磁場のフラックス分布が変化するため、結果として磁場中心が移動する問題が生じる。移動量はおよそ 20 μm から 100 μm 程度である。近年の高精度ビーム調整では、多極磁石における Beam Based Alignment (BBA) は必須の技術であり、磁場強度の変化とともに磁場中心が移動することについては低減化の設計と共にビーム調整の面から慎重な検討が必要である。

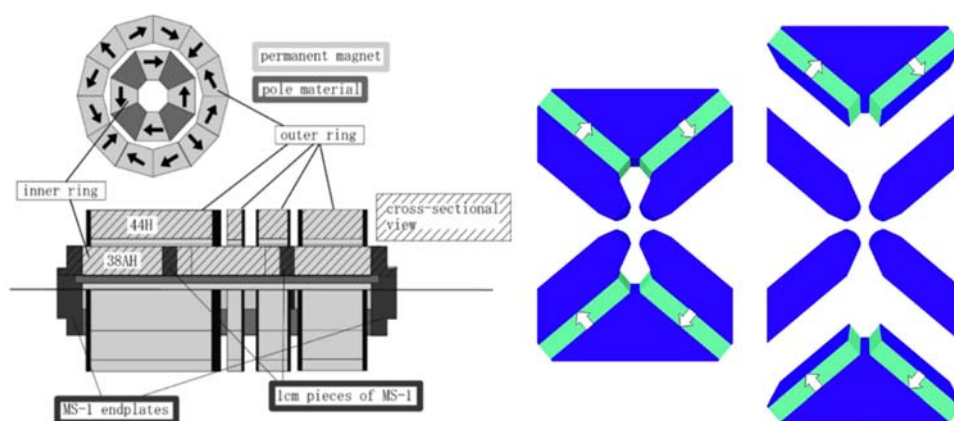


図 II-3-9 可変式四極磁石の概念。矢印部分が永久磁石。
(出典：文献 II-3-5 (右)、II-3-7 (左))

このように TRD 以降、加速器の主要な磁石として永久磁石を適用する試みが進められてきた。特に ESRF-EBS では主偏向磁石として採用され、大規模な製造が行われている。ILC ダンピングリングおよび RTML において、永久磁石の適用を検討することは十分に価値のあることと考えられる。

参考文献

- [II-3-1] “ESRF upgrade programme phase II”, ESRF, December 2014.
- [II-3-2] SPring-8-II Conceptual Design Report (2014): <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- [II-3-3] C. Enabderrahmane, “Review of Permanent Magnet Technology for Accelerators”, IPAC2017, Copenhagen, Denmark, (2017),
http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/talks/thyb1_talk.pdf
- [II-3-4] T. Watanabe et al., “Permanent magnet based dipole magnets for next generation light sources“, Physical Review Accelerators and Beams 20, 072401 (2017)
- [II-3-5] Y. Iwashita, et al., “Field quality and magnetic center stability achieved in a variable permanent magnet quadrupole for the ILC”, PAC 2005, Knoxville, Tennessee, USA, p. 1913 (2005)
- [II-3-6] Y. Iwashita, et al., “Beam Test Plan of Permanent Magnet Quadrupole Lens at ATF2”, IPAC’10, Kyoto, Japan, June 2010, p. 3380 (2010)
- [II-3-7] James A. Clarke, et al., “Novel Tunable Permanent Magnet Quadrupoles for the CLIC Drive Beam“, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 24, No. 3, 4003205 (2014).

4. 加速器・主線形加速器検討結果

1) 主線形加速器の全体構成とコスト

全長 30 km 超の電子・陽電子衝突型加速器である ILC において、超伝導技術を用いてビームを加速する主線形加速器（Main Linac）は ILC の心臓部であり、超伝導加速空洞を内蔵するクライオモジュール（Cavities and Cryomodule）と高周波電力を供給する大電力高周波源システム（L-band High Level RF）から主に構成されている。主線形加速器における 1-RF ユニットの全体構成図を図 II-4-1 に示す。1-RF ユニットにおいて、大電力高周波源である 1 台の 10 MW クライストロン（Klystron）からの高周波電力は、導波管分配システム（Waveguide Distribution System）によって分割され、4.5 台のクライオモジュールに内蔵されている 39 台の 9 セル超伝導加速空洞に供給される。ILC 加速器の要素別コスト分布を図 II-4-2 に示す。この図において、Cavities and Cryomodule と L-band High Level RF の占める割合は、それぞれ 35% と 10% であり、主線形加速器では建設費全体の約 2/3 を担っており、コスト低減化による大きな効果が期待される領域である。

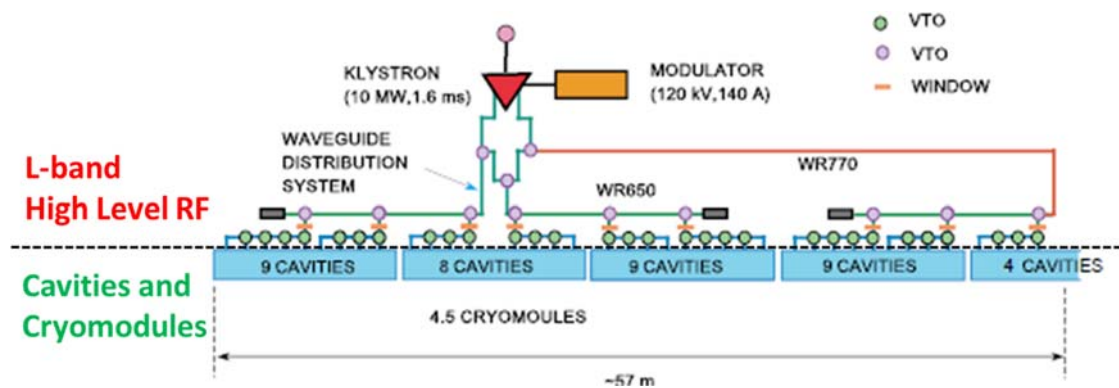


図 II-4-1 主線形加速器における 1-RF ユニットの全体構成図（出典：ILC-TDR）

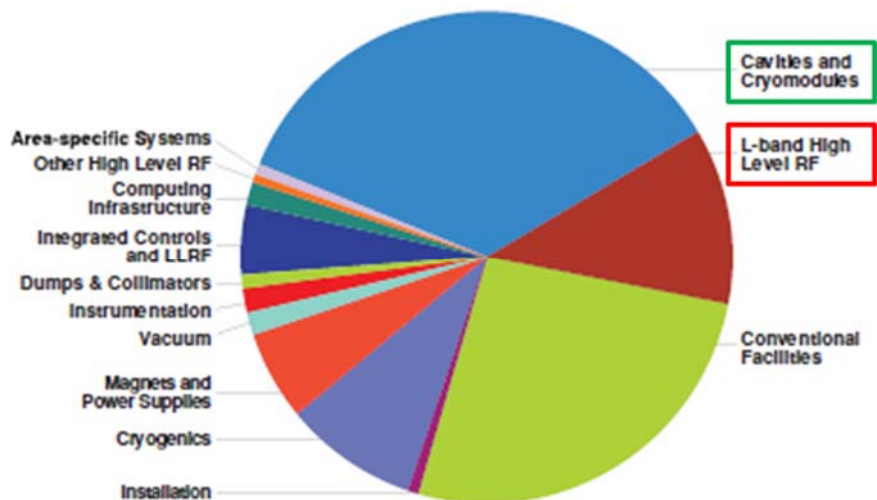


図 II-4-2 ILC 加速器の要素別建設コストの分布（出典：ILC-TDR）

主線形加速器クライオモジュールの構成を図 II-4-3 に示し、その基本仕様を表 II-4-1 に示す。主線形加速器は、1 台のクライオモジュールに 9 台の 1.3 GHz、9-cell 超伝導加速空洞が内蔵される Type A と中央部の 1 台の超伝導加速空洞を超伝導 4 極電磁石（SC Quadrupole）に置き換えた Type B の 2 種類

のクライオモジュールを連結することによって構成される。必要とされる長さ 12.7 m のクライオモジュールの総数は 1,699 台であり、また、製造すべき 1.3 GHz, 9-cell 超伝導加速空洞の総数は、10%の裕度を考慮して 16,216 台となる。

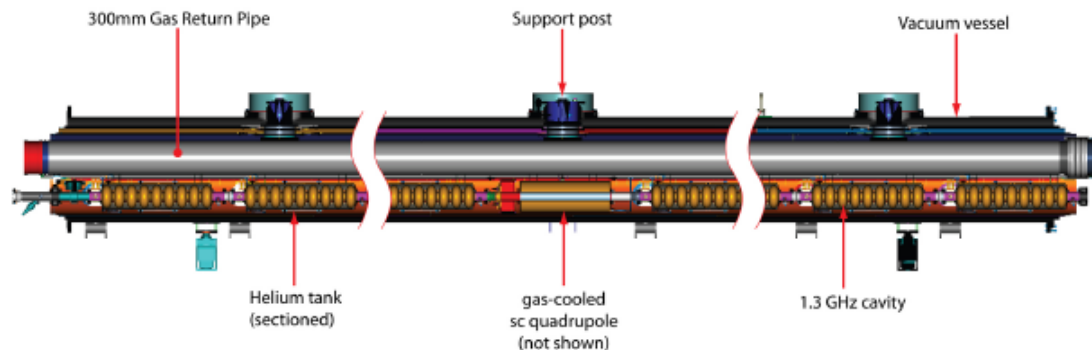


図 II-4-3 主線形加速器クライオモジュールの構成（出典：ILC-TDR）

表 II-4-1 主線形加速器クライオモジュールの基本仕様（出典：ILC-TDR）

<i>Cavity (nine-cell TESLA elliptical shape)</i>		
Average accelerating gradient	31.5	MV/m
Quality factor Q_0	10^{10}	
Effective length	1.038	m
R/Q	1036	Ω
Accepted operational gradient spread	$\pm 20\%$	
<i>Cryomodule</i>		
Total slot length	12.652	m
Type A	9 cavities	
Type B	8 cavities	1 SC quad package
<i>ML unit (half FODO cell)</i> (Type A - Type B - Type A)	282 (285)	units
<i>Total component counts</i>		
Cryomodule Type A	564 (570)	
Cryomodule Type B	282 (285)	
Nine-cell cavities	7332 (7410)	
SC quadrupole package	282 (285)	
Total linac length – flat top.	11027 (11141)	m
Total linac length – mountain top.	11072 (11188)	m
Effective average accelerating gradient	21.3	MV/m
<i>RF requirements (for average gradient)</i>		
Beam current	5.8	mA
beam (peak) power per cavity	190	kW
Matched loaded Q (Q_L)	5.4×10^6	
Cavity fill time	924	μ s
Beam pulse length	727	μ s
Total RF pulse length	1650	μ s
RF-beam power efficiency	44%	

（並列されている数字は、陽電子主線形加速器での数（電子主線形加速器での数）を表す。）

2）主線形加速器の主要構成部品とその仕様

（1）クライオモジュール

クライオモジュールの断面を図 II-4-4（左）に示し、その熱負荷の詳細仕様を図 II-4-4（右）に示

す。クライオモジュールの内部では、2K の液体ヘリウムで冷却された超伝導加速空洞が 2K ヘリウムガス回収配管に吊下げられ、その外側を 5-8K 熱シールドと 40-80K 熱シールドで熱遮蔽され、室温である断熱真空槽の内部に収納されている。ここで、2K 領域から室温部へ直接つながっている 9 台の入力カプラと上部で内蔵物の荷重を支える 3 台のサポートポストからの熱侵入を低減することが、冷凍機の熱負荷を軽減するために重要である。

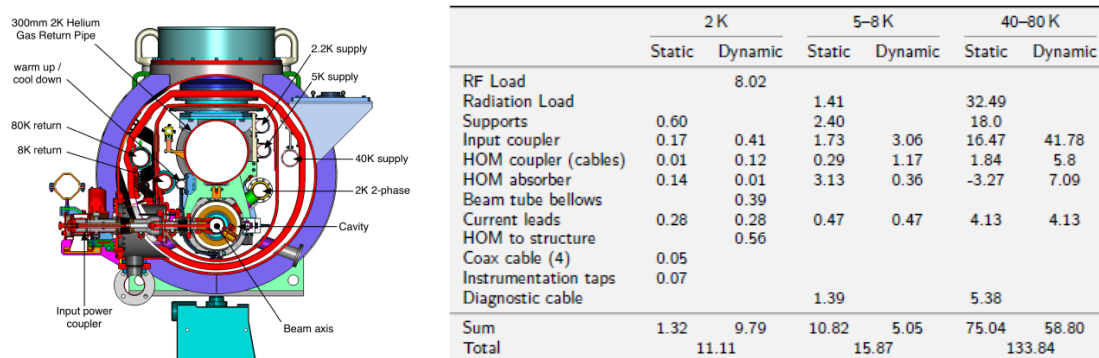
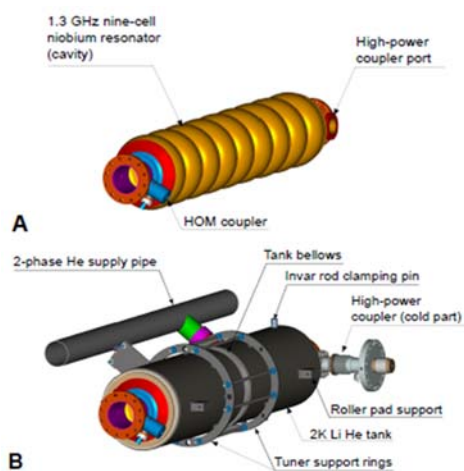


図 II-4-4 クライオモジュールの断面図（左）と熱負荷の詳細仕様（右）
（出典：ILC-TDR）

（２）超伝導加速空洞

1.3 GHz, 9-cell ニオブ製超伝導加速空洞の概略図とその基本仕様を図 II-4-5 に示す。この超伝導加速空洞は、残留抵抗比（RRR: Residual Resistance Ratio）が 300 以上のニオブ材料を用いて製造され、TESLA 型、あるいは、TESLA-like 型のセル形状を有している。超伝導加速空洞の製作において、ニオブ円板から深絞りによるセルの成形とトリム加工、電子ビーム溶接を用いたニオブの接合、空洞内表面の検査、セルの電界強度と周波数調整などが主要な製造工程となる。超伝導加速空洞の完成後には、電解研磨（EP: Electro-polishing）、800℃での真空熱処理、高圧水洗浄（HPR: High Pressure water Rinsing）、120℃ベーキングなどの表面処理工程が行なわれ、清浄で滑らかな空洞内表面を得ることが高加速電界を達成するために重要である。その後、縦測定（VT: Vertical Test）と呼ばれる超伝導加速空洞単体での低温性能試験が実施され、加速電界（Eacc）として 35.0 MV/m（±20%を許容する）で、無負荷 Q 値 0.8×10^{10} 以上の空洞性能を達成することが要求される。空洞性能が確認された後、チタン製ヘリウムタンクが空洞の外側に装着される。超伝導加速空洞製作の全体コストとして、ニオブ材料、空洞製造、表面処理、ヘリウムタンク装着が主要な要素となるが、空洞性能を低下させることなく、各工程のコスト低減化を進めることが重要である。

本件の調査研究においては、特に、低コストが期待されるニオブ材料を用いた空洞製造、および、高電界・高 Q 値の空洞性能の向上が期待される表面処理の開発という 2 点に、重点をおいた研究開発が検討課題となる。

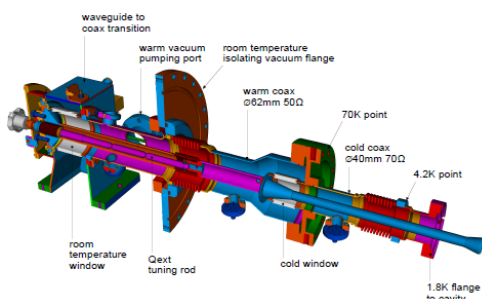


Parameter	Value
Type of accelerating structure	Standing wave
Accelerating mode	TM_{010}, π mode
Type of cavity-cell shape	Tesla (or Tesla-like)
Fundamental frequency	1.300 GHz
Operation:	
- Average gradient (range allowed)	31.5 MV/m ($\pm 20\%$)
- Quality factor (at 31.5 MV/m)	$\geq 1 \times 10^{10}$
Qualification:	
- Average gradient (range allowed)	35.0 MV/m ($\pm 20\%$)
- Quality factor (at 35 MV/m)	$\geq 0.8 \times 10^{10}$
- Acceptable radiation (at 35 MV/m)	$\leq 10^{-2} \text{ mGy/min}^{\dagger}$
Active length	1038.5 mm
Total length (beam flanges, face-to-face)	1247.4 mm
Input-coupler pitch distance, including inter-connection	1326.7 mm
Number of cells	9
Cell-to-cell coupling	1.87%
Iris aperture diameter (inner/end cell)	70/78 mm
Equator inner diameter	~ 210 mm
R/Q	1036 Ω
$E_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	2.0
$B_{\text{peak}}/E_{\text{acc}}$	4.26 mT/(MV/m)
Tunable range	± 300 kHz
$\Delta f/\Delta L$	315 kHz/mm
Number of HOM couplers	2
Q_{ext} for high-impedance HOM	$< 1.0 \times 10^5$
Nb material for cavity (incl. HOM coupler and beam pipe):	
- RRR	≥ 300
- Mechanical yield strength (annealed)	≥ 39 MPa
Material for helium tank	Nb-Ti Alloy
Max design pressure (high-pressure safety code)	0.2 MPa
Max hydraulic-test pressure	0.3 MPa

図 II-4-5 ニオブ製超伝導加速空洞本体（左 A）、チタン製ヘリウムタンク装着後の超伝導加速空洞（左 B）と超伝導加速空洞の基本仕様（右）（出典：ILC-TDR）

（3）入力カプラ

入力カプラは、高周波源からの高周波電力を超伝導加速空洞に供給する役割を持ち、空洞との真空境界となるセラミック製の高周波真空窓を有する重要な機器である。ILC は、パルス幅 1.65 ms、繰り返し 5 Hz/10 Hz でピーク高周波電力として約 400 kW のパルス運転が行われ、2%以下の低い duty factor であることから冷却機能を考慮する必要はない。図 II-4-6 に、TDR での入力カプラの候補の一つである TTF-III 型入力カプラの構造図とその詳細仕様を示す。空洞との結合度を可変にする機構、空洞への熱侵入を小さくするための銅メッキの純度と厚みの最適化、マルチパッキングを抑制するためのセラミック窓の TiN コーティングなどが重要な技術である。



Parameter	Specifications
Frequency	1.3 GHz
Operation pulse width	1.65 ms
Operation Repetition rate	5 Hz / 10 Hz
Maximum beam current	8.8 mA
Accelerating gradient of cavity	31.5 MV/m $\pm$ 20%
Required RF power in operation	~ 400 kW
Range of external Q value	$(1.0 \sim 10.0) \times 10^5$ (tunable)
RF process in cryomodule	> 1200 kW for $\leq 400 \mu\text{s}$ pulse width > 500 kW for $> 400 \mu\text{s}$ pulse width > 600 kW for 1.6 ms pulse width
RF process with reflection mode in test stand.	
RF process time	< 50 hours in warm state < 20 hours in cold state < 0.01 mW (2K static)
Approximate heat loads	0.07 W (5K static) 0.6 W (40K static) < 0.02 W (2K dynamic) 0.12 W (5K dynamic) 1.6 W (40K dynamic)
Number of windows	2
Bias voltage capability	Required

図 II-4-6 TTF-III 型入力カプラの構造（左）と詳細仕様（右）（出典：ILC-TDR）

(4) 周波数チューナー

超伝導加速空洞の共振周波数を制御するための周波数チューナーは、粗調整用ステッピングモーター駆動による機械式低速チューナーと微調整を行うためのピエゾ素子による電気式高速チューナーとの組合せで構成される。図 II-4-7 に、TDR での周波数チューナーの方式の一つであるブレード型チューナーの構造図とその詳細仕様を示す。できるだけ単純な構造で、堅牢かつ高信頼性を有し、故障に対して簡単に交換できること、さらに安価であることが必要である。ドイツ DESY 研究所の自由電子レーザー European XFEL や米国 SLAC 研究所に建設中の自由電子レーザー LCLS-II で採用されているチューナーを含めてコスト削減も検討されている。周波数チューナーは、ヘリウムタンクの構造と密接な関係があり、超伝導加速空洞を含めた全体の剛性を考慮した調和のとれた設計検討が重要である。

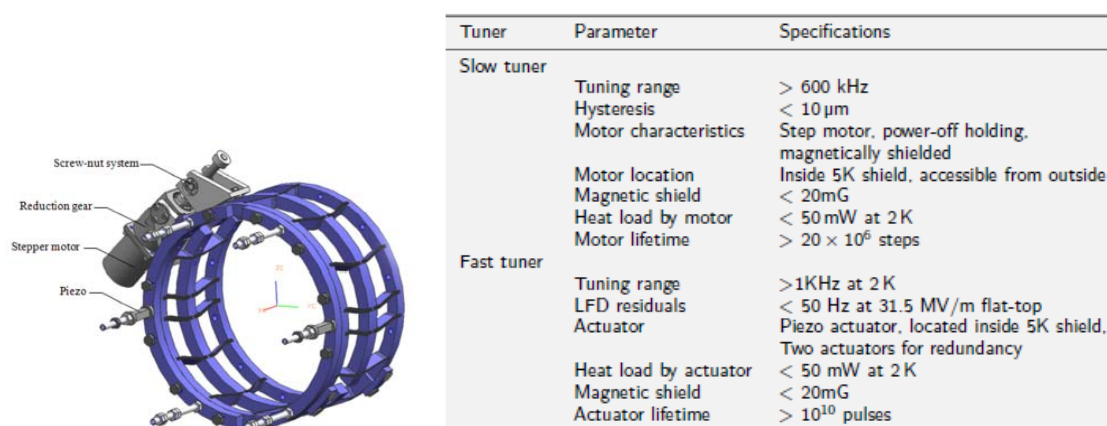


図 II-4-7 ブレード型チューナーの構造図（左）と詳細仕様（右）（出典：ILC-TDR）

(5) 大電力高周波源システム

1-RF ユニットで 39 台の 9-cell 超伝導加速空洞に高周波電力を供給する 10 MW クライストロンとその詳細仕様を図 II-4-8 に示す。高圧電源に要求される仕様は、印加電圧 120 kV 以上、ビーム電流 140 A 以下であり、クライストロンは効率 65%程度にて運転される。10 MW のパルス高周波電力を 39 台の超伝導加速空洞に分配する大電力導波管分配システムは、電力分配器、位相調整器、サーキュレーター、ダミーロードなどの WR650 導波管を使用した構成部品で構築されており、ベロー導波管を経由して入力カプラに接続され、それぞれの超伝導加速空洞に高周波電力が供給される。各構成部品について、量産化効率の良い製造方法の技術検討がコスト低減化の課題となる。

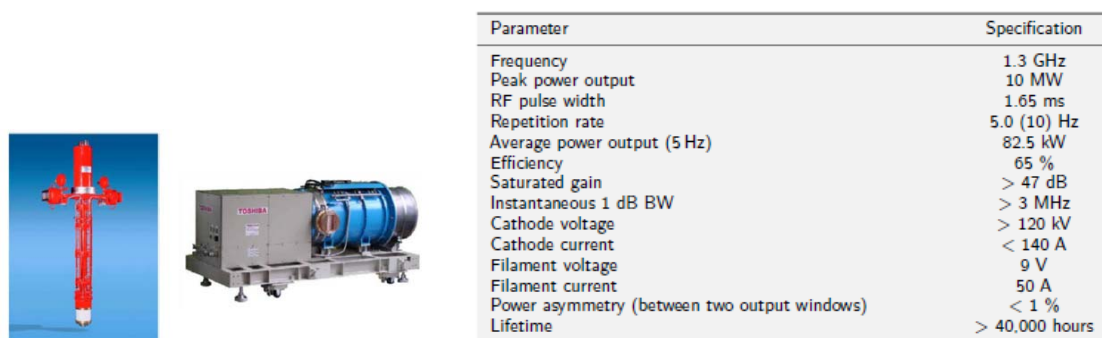


図 II-4-8 10MW クライストロン（左）と詳細仕様（右）（出典：ILC-TDR）

3) 主線形加速器主要構成部品のコスト低減化の検討課題

加速器建設コスト全体に対する超伝導加速空洞とクライオモジュールのコストは 35%であると TDR には示されているが、その内訳は明記されていない。そのコストの主要部分となる構成部品としては、ニオブ材料、空洞製造、表面処理、ヘリウムタンク、入力カプラ、周波数チューナー、磁気シールド、RF フィードスルーなどが考えられる。この中で、低コストが期待されるニオブ材料を用いた空洞製造技術の開発、高電界・低損失実現のための表面処理の開発、マルチパクティングを抑制するための TiN コーティング不要のセラミック窓を使用した入力カプラの開発、フッ酸を利用する電解研磨方法の改善などが、短期的なテーマとして挙げられる。中・長期的には、超伝導薄膜を使った超伝導加速空洞の開発や、液圧成形を利用した空洞製造などがコスト削減に寄与できる可能性がある。

5. ビーム供給・最終収束系 (BDS: Beam Deliverly System)

1) 調査の対象

本報告書における測定器に関するコスト削減研究開発の調査は、TDR の他、年 2 回開催されるリニアコライダーの国際会議をはじめとするさまざまな研究会で発表された研究成果やそでの議論に基づいている。

2) BDS ビームラインの概要

BDS は、主線形加速器下流のビームラインの総称で、ビーム診断セクション、ビームコリメーションセクション、最終収束ビームラインならびに、チューニング用、主ビームダンプへビームを運ぶビームラインで構成されている (図 II-5-1)。ビーム診断セクションでは、主線形加速器で加速されたビームのエネルギー、エミッタンスおよび偏極度を測定し、下流のビームラインに要求されるビームパラメーターにビームを合わせる役割がある。また、ビームの性質が下流のビームラインの要求に満たない場合は、チューニング用ビームダンプにビームを捨てることになる。また、チューニング用ビームダンプは、ビーム特性が良くないビーム調整時のビームを捨てる際にも使用される。ビームコリメーションセクションでビームの芯部分だけを通すことで、測定器へのバックグラウンドを大幅に減らすことができる。最終収束ビームラインは、衝突点でビームを絞るためのビームラインで、衝突点を通過したビームは、主ビームダンプに捨てられる。

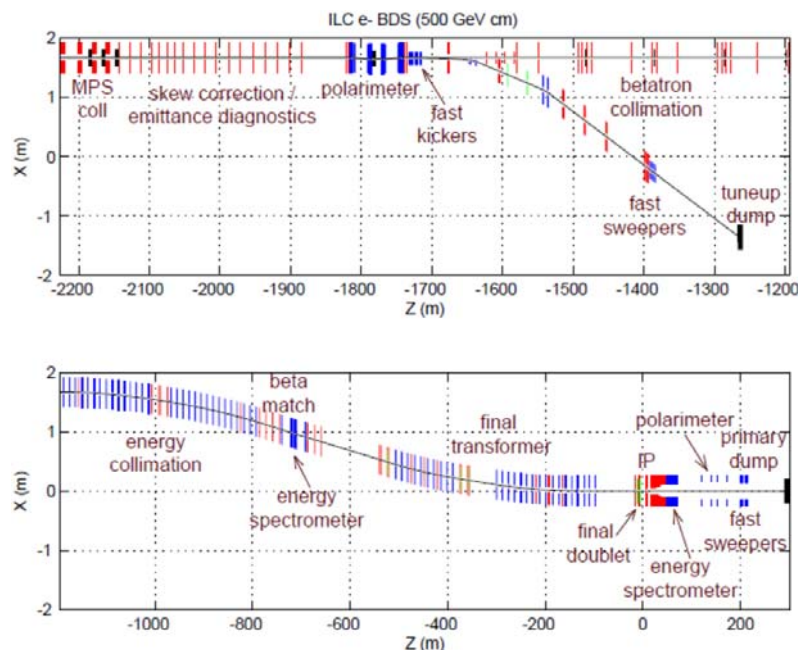
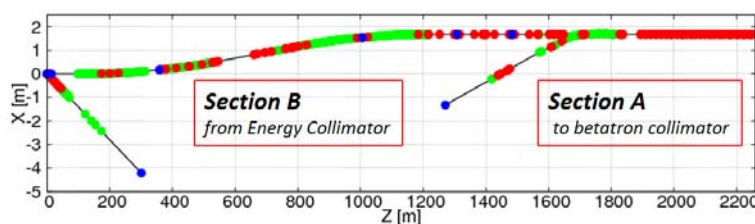


図 II-5-1 ILC の Beam Delivery System (BDS) の全体図 (出典: ILC-TDR)

BDS ビームラインのコスト低減のためには、ビームラインを短くすることが最も効果的だが、今後のエネルギー増強の可能性を残すために同じトンネルを使って重心系エネルギーが 1 TeV まで対応できるように、BDS ビームラインは設計されている。BDS セクションのトンネルはビームを曲げた時にシンク

ロトロン放射の影響が大きいので、地球の曲率に沿って掘られる他のトンネルと異なり直線的に掘る必要がある。そこで、ビームコリメーションセクション、最終収束ビームラインは、最もシンクロトロン放射の影響が強い 1 TeV 運転にも耐えられるように長さが決められ、同じビームラインの配置で 250 GeV から 1 TeV までの重心系エネルギーに対応可能なように設計されている（図 II-5-2）^{III-5-1}。また、ビーム診断セクションは、そこで使用するビームサイズモニターで測定できる最小のビームサイズでビームライン長が決まる。BDS ではビームのエネルギーが高いので、モニターの耐久性、周囲への放射線の影響を考えると、非破壊型のビームサイズモニターの使用も必須になる。

BDS の最終収束系の研究は KEK の ATF2 で行われている。ATF2 において、BDS 診断セクションに使用可能なレーザーワイヤービームプロファイルモニターの研究開発が進められ、1 μm 分解能の非破壊型ビームサイズモニターの開発が行われた（図 II-5-3）^{III-5-2}。この研究開発の結果、現在の BDS 診断セクションは、1 μm 分解能の非破壊型ビームサイズモニターを前提とした長さのビーム診断セクションになっている。



The number of components both for ECM=500GeV and ECM=1TeV

	Energy [GeV]	# of BEND	# of QUAD	# of SEXT	# of Steer	# of PS	# of Mover	# of BPM
Section A	500	16	64	0	19	73	70	78
	1000	43	108	0	19	115	108	116
Section B	500	63	33	7	55	46	40	101
	1000	176	41	7	55	56	48	112

図 II-5-2 1 TeV 運転時の BDS ビームラインの電磁石配置。赤丸は四極電磁石、緑丸は偏向電磁石の配置を示す。1 TeV 運転時は電磁石の数を追加することで 500 GeV までと同じビームライン配置で対応できる（出典：文献 II-5-1）

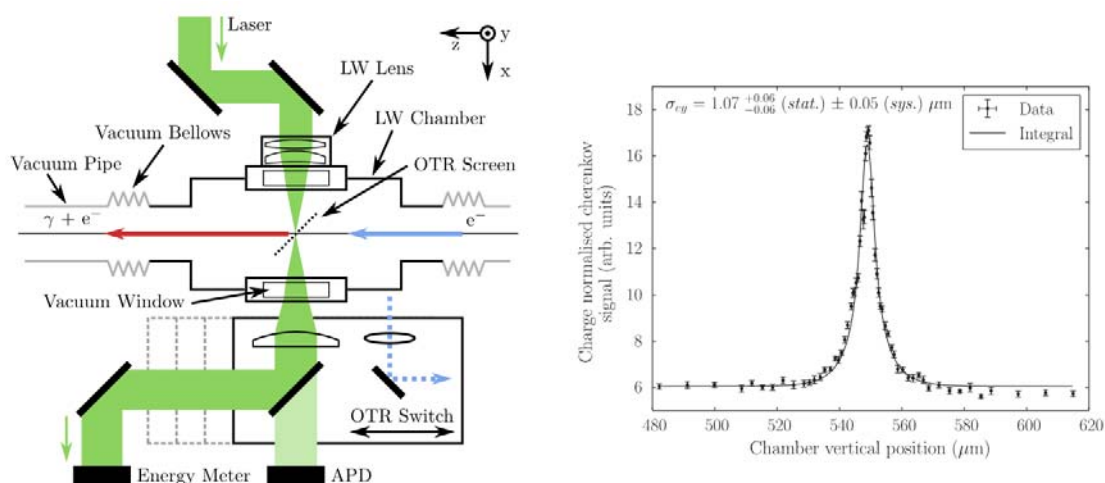


図 II-5-3 KEK の ATF2 で研究開発が進められたレーザーワイヤービームプロファイルモニター装置の概念図と、測定された最小ビームサイズ（出典：文献 II-5-2）

超伝導電磁石を使用する最終収束電磁石システムを除くと、ビームライン上に使用される電磁石には特殊なものは少ない。最終収束電磁石は超伝導四極電磁石 2 個、超伝導六極電磁石 2 個、さらに、それらの電磁石群に対する測定器のソレノイド磁場の影響を相殺するための超伝導反ソレノイドコイルで構成されている^[II-5-3]。反ソレノイドコイルが大きくなると、最終収束電磁石を収めるクライオモジュールが大きくなり、コストが高くなるだけでなく、測定器の不感領域が増えるため、反ソレノイドコイルの最小化の研究が進められた。反ソレノイドコイルは、TDR 作成時には 220 mm 径までコンパクトな設計になっている。

Reference Design Report^[II-5-4]では、2ヶ所の衝突点を計画していたため、電子および陽電子ビームラインそれぞれ二つ、計 4 本の最終収束ビームラインがあった。TDR ではプッシュプル方式として二つの測定器を入れ替えるシステムを採用することになり、電子および陽電子の最終収束ビームラインがそれぞれ一つに減り、大幅にコストが削減された。

3) コスト削減の検討

TDR 作成後も BDS セクションでの更なる研究開発は進められている。それらの研究開発の概要、および、それらのコスト削減効果を順に報告する。

(1) 反ソレノイドコイルの検討

米国ブルックヘブン国立研究所の重イオン衝突型加速器 (RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider) では、スイートスポットコイルを使うことで、反ソレノイドコイルのコンパクト化、および、スイートスポットコイルで作られる四極電磁石磁場を利用することにより、最終収束電磁石磁場を 36% 低く抑えるデザインが提唱されている^[II-5-5]。四極電磁石磁場を低く抑えることができれば磁石自体のコンパクト化など、コスト削減の一助になることが期待できる。そこで、このアイデアを ILC の最終収束電磁石に適用する検討が行われた。ILC の場合は最終収束電磁石の磁場中心と反ソレノイドの磁場中心が大きく離れており、eRHIC ほどの四極電磁石磁場が得られない (図 II-5-4)^[II-5-6]が、スイートスポットコイルを使うことで反ソレノイドコイルの外径を 190 mm まで縮めることが可能となる。最終収束電磁石システムのクライオモジュールのコンパクト化を通して、測定器の不感領域の低減には一定の効果があることが期待されるので引き続き検討を進める価値はあると考えられる。

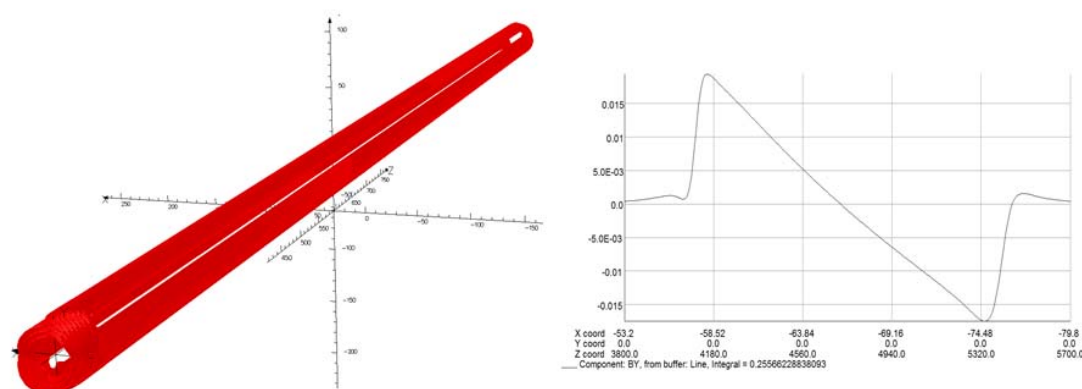


図 II-5-4 ILC の最終収束電磁石のスイートスポットコイルを使った反ソレノイドコイルの設計結果 (出典: 文献 II-5-6)

(2) 最終収束電磁石の冷却システムの検討

TDR では、ヘリウム伝送ラインで生じる振動を、超流動を利用することで抑えるため、最終収束電磁石は 2K のヘリウムで冷やすことにしている。しかし、2K のヘリウムを使うためには、最終収束電磁石の近くに 2K のヘリウム冷凍機を設置しなければならず、ヘリウム冷凍機の真空ポンプによる振動が問題になる可能性が懸念されている。一方、SuperKEKB の最終収束電磁石では 4K ヘリウムによる冷却方式を採用している。振動許容値は ILC のものと同様の 25-50 nm であり、ここでの 4K ヘリウム伝送ラインでの振動が及ぼす影響の理解が進むことで、ILC の設計にも一定の知見が得られるものと期待される。SuperKEKB における最終収束電磁石の振動測定は平成 28 年度日米科学技術協力事業実施課題として進められている^[II-5-7]。SuperKEKB における結果から、ILC においても 4K ヘリウムによる冷却方式で充分であることが理解されれば、2K のヘリウム冷凍機を省くことによる装置の簡略化により、1~2 億円程度のコスト削減が期待される。

(3) ビームダンプの検討

TDR 以後、ビーム調整計画の抜本的な合理化が進められ、チューニング用ビームダンプの許容パワーが、主ビームダンプと同じであった 14 MW から 400 kW へと大幅に低減された。その結果、14 MW ビームダンプは 4 台から 2 台に削減され、大きくコストが削減されている。

(4) 偏向電磁石の永久電磁石化の検討

ダンピングリングの節でも検討したが、電磁石を永久磁石化することで、製造コストだけでなく、それに伴う電源、冷却水システムや電力ケーブルなどの付帯設備の設置コスト、運転電力の低減に寄与することが期待される。BDS システムでは 100 台を超える偏向電磁石が配置される。これらの電磁石は、シンクロトロン放射によるエミッタンス増大を抑えるために、強さが 1 kG 以下に設計されており、ビームのエネルギーを変えない限り一定の強さで使用される。これらの電磁石を永久磁石化することで、特に運転コストの低減が期待できる。

参考文献

- [II-5-1] T. Okugi, "ILC Final Focus Beamline Optimization", Asian Linear Collider Workshop 2015, https://agenda.linearcollider.org/event/6557/contributions/31795/attachments/26214/40169/ILCBDS_okugi_20150421_newest.pdf
- [II-5-2] Y. Nosochkov and A. Seryi, "Compensation of detector solenoid effects on the beam size in a linear collider", Rev. Mod. Phys. 8 (2005) 2.
- [II-5-3] L. J. Nevay et al., "Laserwire at the Accelerator Test Facility 2 with submicrometer resolution", Phys. Rev. ST Accel. Beams 17 (2014) 072802.
- [II-5-4] ILC Reference Design Report, <http://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Reference-Design-Report> (2007).
- [II-5-5] Brett Parker, "SWEET SPOT DESIGNS FOR INTERACTION REGION SEPTUM MAGNETS," Proceedings of IPAC2016 (2016) 1196.
- [II-5-6] Brett Parker, "Interaction Region Magnets for ILC in Japan, SuperKEKB and eRHIC at BNL", KEK 加速器セミナー (2016/10/5).
- [II-5-7] 大内徳人ほか、「SuperKEKB・ナノビーム衝突点用超伝導コイル及び磁場測定装置の開発と建設」平成 28 年度日米科学技術協力事業実施課題

6. 加速器土木

1) 調査の対象

加速器土木 (CFS: Conventional Facilities and Siting)とは、リニアコライダー加速器を収めるための地下トンネルの設計、施工ならびに電気設備および機械設備に関する設計と施工のほか、関連する地上設備、地上建屋、その他の関連機器のことである。

TDR における CFS に含まれる項目を表 II-6-1 に示す。

表 II-6-1 TDR に含まれる CFS 項目一覧

施設・設備の項目 (CFS) (Conventional Facilities and Siting)

(1) 土木 (Civil Engineering)

- ①地下施設建設 (Underground construction)
 - ②地上建物建設 (Surface buildings)
 - ③サイト・キャンパス施設整備 (Site development)
- (2) 電気設備システム (Conventional Electrical System)
- (3) 機械設備システム (Conventional Mechanical System)
- (4) ハンドリング設備 (Handling Equipment)
- (5) 安全設備 (Safety Equipment)
- (6) 測量と機器アライメント (Survey and Alignment)

土木の地下施設建設 (図 II-6-1 参照) には、アクセストンネル (シャフト)、加速器トンネル、測定器ホール、アクセスカバーン、その他が含まれる。地上建物建設 (図 II-6-2 参照) には、中央キャンパス建物、測定器組立棟、事務棟、施設棟、ヘリウム冷凍機棟、制御棟、アセンブリー棟、アクセスコントロール棟、ユーザー棟、その他が含まれる。

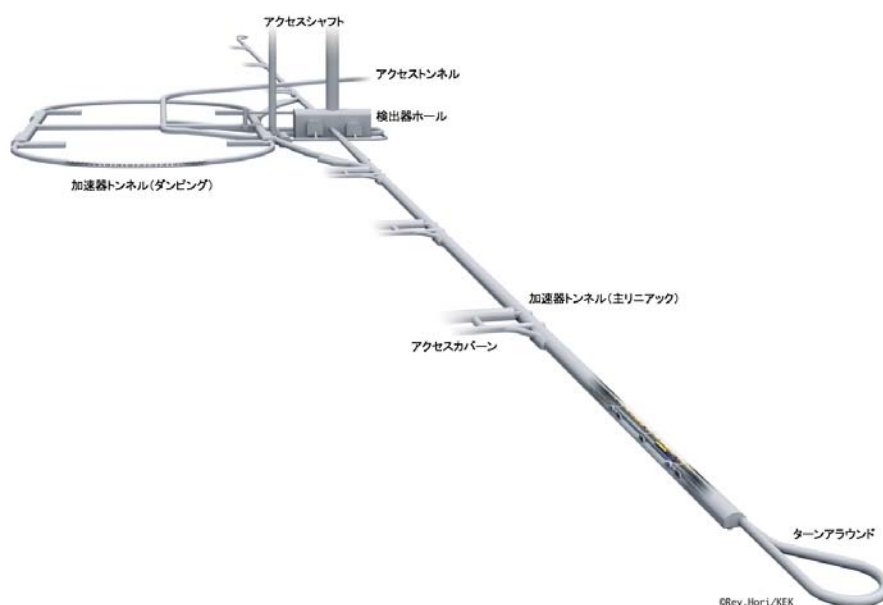


図 II-6-1 ILC 地下施設建設項目

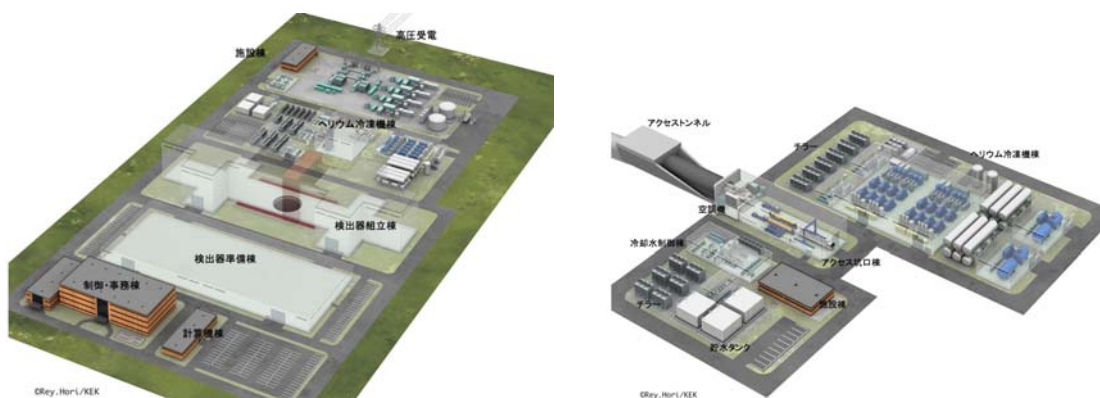


図 II-6-2 ILC 地上施設の例 左は衝突点地上部の例、右はアクセス坑口地上部の例

サイト・キャンパス施設整備には、建設サポート、サイト準備と造成、ユーティリティ接続、道路と駐車場、環境整備、その他が含まれる。電気設備システムには、高圧電気、低圧電気、非常用電源、制御と通信が含まれる。機械設備システムには、空調、冷却水、下水、消火設備、エネルギー供給（燃料）などが含まれる。ハンドリング設備には、クレーン、エレベーター、ホイスト、補助エレベーター、道路運搬車両、トンネル内運搬車両などが含まれる。安全設備には、安全警報システム、安全用アクセス制御、その他の安全機器が含まれる。測量と機器アライメントには、測量ネットワーク作成、機器測量、機器アライメント、関連するソフトウェアとデータベースなどが含まれる。

2) 調査項目

コスト削減に大きな効果をもつ事項としては、地下施設のための掘削量の削減と掘削スケジュールの短縮が考えられる。掘削量の削減は、以下に示す項目について検討する。

- (A1) 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更
- (A2) ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更
- (A3) 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化
- (A4) 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化

これらについては、「加速器土木のコスト削減」の節で詳述する。

また、掘削スケジュールの短縮化は掘削ルートに沿った詳細な地質調査が済むまではどのような工程・手法をとるべきかを決定できず、TDR 記載のスケジュールからどれくらい短縮できるかは検討事項である。掘削する地質が詳しくわかっていない今の時点での掘削スケジュールの短縮として考えられる方法は、現在ある技術の組み合わせにより以下の項目が考えられる。

- (B1) 前方切羽の高速地質探査によるリスク回避
- (B2) トンネル掘削のスピードアップによるスケジュール短縮
- (B3) 高速大量ズリだしによるスケジュール短縮
- (B4) 覆工コンクリートの高速施工によるスケジュール短縮
- (B5) 合理的な中央遮蔽壁建設によるスケジュール短縮
- (B6) 合理的な測定器ホールと付随する垂直シャフト施工方法の選択

(1) 前方切羽の高速地質探査によるリスク回避

前方切羽の地質をいかに前もって掴んでおくかはリスク回避の点で重要である。地上からの弾性波探査や電磁探査では、大きな土被りのあるトンネル掘削では確実性に欠けるので、掘削を進めながら切羽前方に長尺の水平コアボーリング（ロータリーボーリングあるいはロータリーパーカッションドリル）

(図 II-6-3 参照) を行なって岩石探査を行う必要がある。

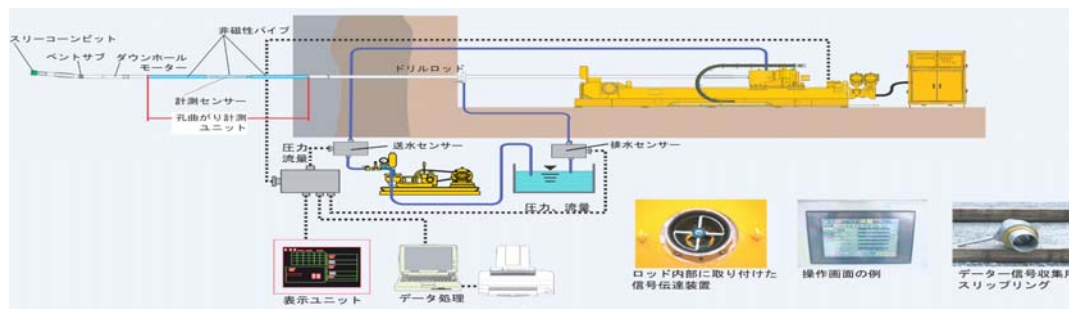


図 II-6-3 長尺水平コアボーリングの概念図 (出典：文献 II-6-1)

(2) トンネル掘削のスピードアップによるスケジュール短縮

急速施工技術には、トータルステーションによる位置計測と連動した削孔機能を持つコンピューター自動化油圧ジャンボ (図 II-6-4 参照) を使用する。そのジャンボは多数の削孔アームを備えることができ、削孔の人員削減と時間短縮を行える。また、地山地質が安定である場合、そしてズリだし能力が十分である場合には、深い削孔と多量の爆薬量を使って長孔発破を行ない、一回の発破で通常 1-2m の掘削を 3-6 m 増やす事で 3 倍のスケジュール短縮を行える。

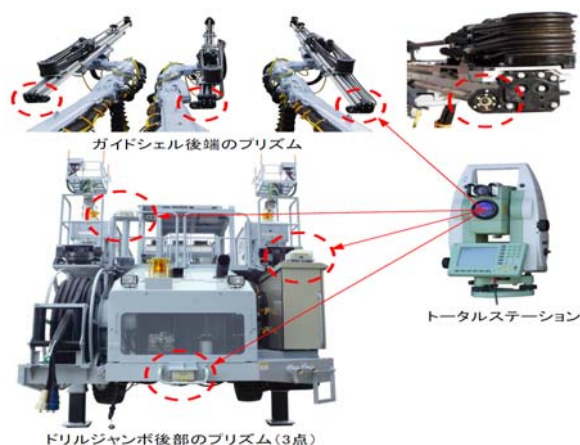


図 II-6-4 トータルステーションによる削孔位置計測と連動した削孔システム (出典：文献 II-6-1)

(3) 高速大量ズリだしによるスケジュール短縮

長尺トンネルの場合のズリだしには、トラックを使用するよりは、ベルトコンベアを使用したほうが、交通や換気などの安全性の確保と大量のズリ移動が可能となる。自走式クラッシャーとテールピース台車、引き続き連速ベルトコンベアで可能となる (図 II-6-5 参照)。

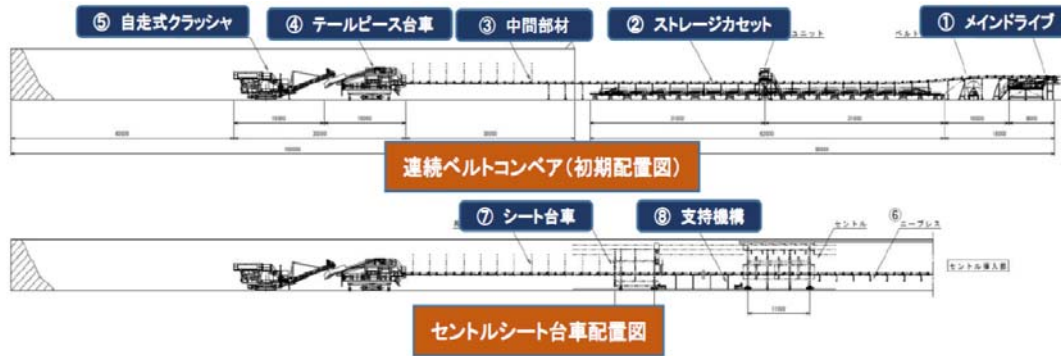


図 II-6-5 連続ベルトコンベア方式の概要 (出典：文献 II-6-1)

(4) 覆工コンクリートの高速施工によるスケジュール短縮

掘削直後の防水シート施工と覆工コンクリート施工には、床レール上に構築する新型テレスコピックセトル工法（図 II-6-6 左参照）が利用でき、それにより工程を短縮できる。また、防水工には、背面平滑トンネルライニング工法（図 II-6-6 右参照）を用いることでコンクリートのひび割れ低減と防水シートの平滑敷設を行うことができ、防水シート破損のリスクを軽減できる。また、覆工厚さを均一にでき、その部分の応力集中を避けることができる。

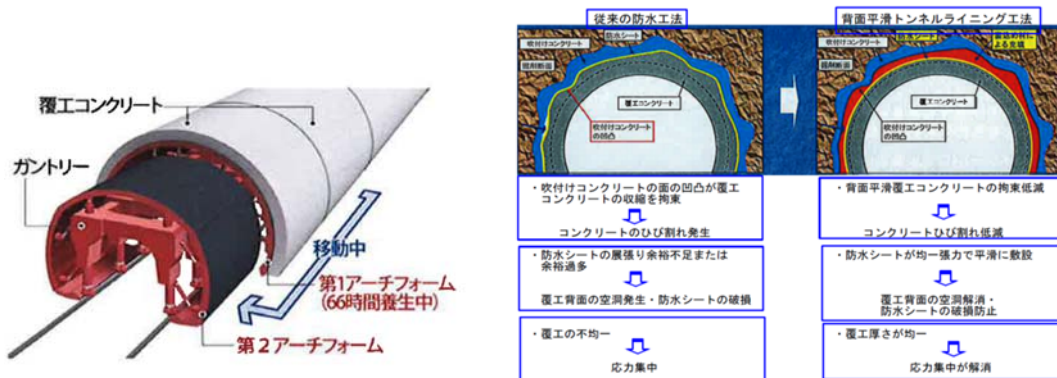


図 II-6-6 新型テレスコピックセトル工法（左）と背面平滑トンネルライニング工法（右）の概要（出典：文献 II-6-1）

(5) 合理的な中央遮蔽壁建設によるスケジュール短縮

現場近くで施工するプリキャスト中央遮蔽壁の工法は、トンネル掘削が始まる前からの製造が可能であり、現場設置施工のかなり前から製造保管蓄積しておくことが可能である。したがって、覆工コンクリートが施工台車で掘削前方に進んでいくすぐ後方で、床板施工と中央壁設置施工を追従して行うことが可能である。この場合にはズリだしベルトコンベアが設置されている場所の施工は後回しになるであろう。巧妙なスケジュール管理を行えば、中央壁の現場打ちよりはスケジュール短縮になる可能性が大きい。

(6) 合理的な測定器ホールと付随する垂直シャフト施工方法の選択

測定器ホールは地下に大空洞を掘削することになる。垂直シャフト（立坑）はその天井部分に掘削される。掘削工法のスピードとズリだしスピードがスケジュールを決めることになる。立坑掘削は地上から下に向かって行われ、その部分のズリ出しは垂直コンベアにより排出される。この施工方法は大空洞アーチ部まで同一で行われ、その間に斜坑アクセストンネルを貫通させ、アーチ部空洞から下部のアク

セストンネルまでグローリーホールを貫通させ、それをズリだしに利用する。立坑の工法は、全断面発破掘削掘り下げ法による掘削（図 II-6-7 参照）がコスト最小で行える。

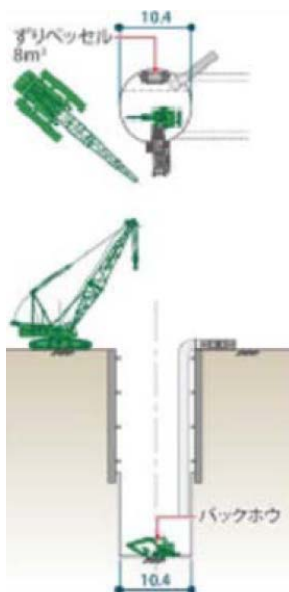


図 II-6-7 全断面発破掘削掘り下げ法の概要 （出典：文献 II-6-1）

ここで示したスケジュール短縮法は、現在ある技術の組み合わせにより可能と考えられるので、新技術によるコスト削減をもたらすというものではない。さらに、掘削する地質条件に左右されるものでもある。

参考文献

- [II-6-1] 一般社団法人 先端加速器科学技術推進協議会（Advanced Accelerator Association Promoting Science & Technology (AAA)）第 12 回 Civil 部会報告（2017 年 11 月 30 日秋葉原）

7. 測定器

1) 調査の対象

本報告書における測定器に関するコスト削減研究開発の調査は、TDR (Volume 4: Detectors) のほか、年 2 回開催されるリニアコライダーの国際会議をはじめとするさまざまな研究会で発表された研究成果やそこでの議論に基づいている。

2017 年 10 月にフランスのストラスブールで開催されたリニアコライダーの国際会議 LCWS 2017 においては、LCC の下部組織である Physics and Detector Executive Board の会合に参加し、測定器グループ (SiD および ILD) の代表者を含む ILC の物理と測定器のコミュニティを代表するメンバーの意見を聴取した。

2) TDR に示された測定器の概要

ILC においては二つの測定器が交互に衝突点に設置されて実験を行う。TDR ではこれら二つの測定器として、ILD (International Large Detector) ならびに SiD (Silicon Detector) が記述されている (図 II-7-1)。どちらの測定器も国際的なグループによって詳細な検討が行われているが、TDR 執筆の時点では ILD は日欧の研究者が主体、SiD は米国の研究者が主体となっている。実験結果に対するクロスチェックを行うことで、結果の信頼性が飛躍的に高まるのが測定器および実験グループが二つ必要な最大の理由である。特に、予想外の実験結果が出た場合、二つの測定器、二つの異なる実験グループから同様の結果が得られることは決定的に重要な要件となる。

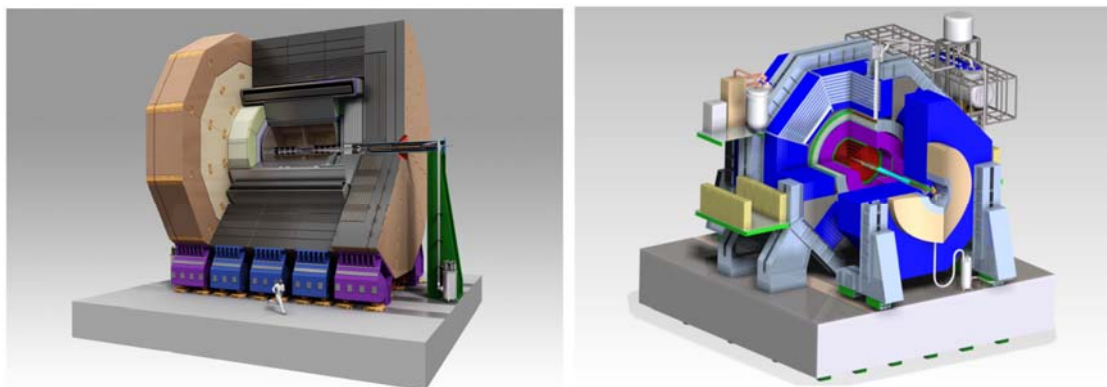


図 II-7-1 ILC 用測定器 ILD (左) および SiD (右) (出典: ILC-TDR)

ILC のような衝突型加速器による実験に用いられる測定器は、一般的に、いくつかの異なった目的を持った検出器 (サブディテクター) が衝突点周りを同心円状に囲むような構造になっている。ILD の場合の断面図を図 II-7-2 に示す。ILD の場合、衝突点に近い順に、バーテックス検出器 (VTX または VXD)、シリコン内部飛跡検出器 (Si Inner Tracker)、中央飛跡検出器としての TPC、シリコン外部飛跡検出器 (Si Outer Tracker)、電磁カロリメーター (ECAL)、ハドロンカロリメーター (HCAL)、超伝導ソレノイドコイル (Coil)、ミューオン検出器 (Muon) および鉄リターンヨーク (Yoke) から構成されている。前後方の電子・陽電子ビームの通るチューブに近い場所には前方カロリメーター (FCAL) が設置される。これらのうち、VTX および各種の飛跡検出器は荷電粒子の飛跡を高分解能で測定し、ECAL は電子と γ 線のエネルギーを HCAL はハドロンと呼ばれる強い相互作用をする粒子のエネルギーを測定す

る。ミューオン検出器はカロリメーターおよびコイルの外側に置かれ、カロリメーターをすり抜けてきたミュー粒子を検出する。超伝導ソレノイドコイルおよび鉄リターンヨークは超伝導電磁石（Magnet）を構成し、飛跡検出器の設置された空間に 3.5 T の磁場を作り出し、それによって荷電粒子をその運動量に応じた曲率半径で曲げるためのもので、粒子検出の機能は有しない。SiD の場合も飛跡検出器に違いがあるが（TPC はなく、すべてシリコン飛跡検出器で構成される）、基本的には同様の構成となっている。

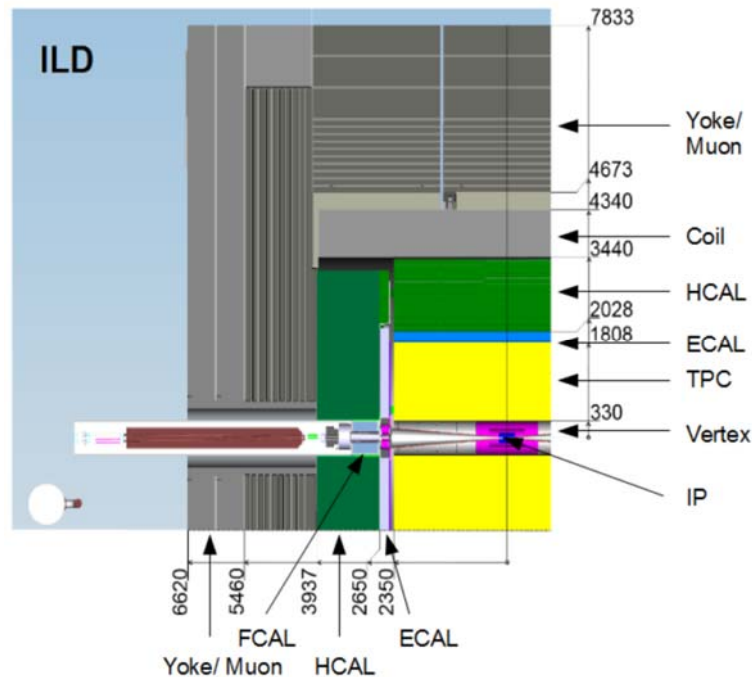


図 II-7-2 ILD 測定器の断面図（一部）（出典：ILC-TDR）。シリコン内部飛跡検出器およびシリコン外部検出器は省略してある。IP は衝突点を意味する。

ILC で用いられる測定器は、LHC で用いられている測定器に比較して、はるかに高分解能を持つことが要求されている。そのために各サブディテクターは高精細・多チャンネルのセンサーを装備することとなる。さらに VTX や飛跡検出器は多重散乱によるバーテックス分解能や運動量分解能の劣化を防ぐために、極力、物質量を減らすことが求められている。各サブディテクターの性能をさらに向上させ、より精密な物理成果を出すためには、研究開発の継続が必須である。

TDR において、測定器のコストはサブディテクターごとに評価された。さらにビームの通るチューブ（Beam tube）およびデータ収集に必要な装置類（DAQ）のコスト、現場においてサブディテクターを測定器システムに組み上げるためのコスト（Integration）、世界各地で製作されたサブディテクターまたはその部品の輸送費（Transport）なども評価された。図 II-7-3 は各サブディテクターがコストのどれだけの割合を占めているかを表したものである。SiD の場合、Tracker はシリコン飛跡検出器、Magnet はコイルと鉄リターンヨークを合わせたものを表している。

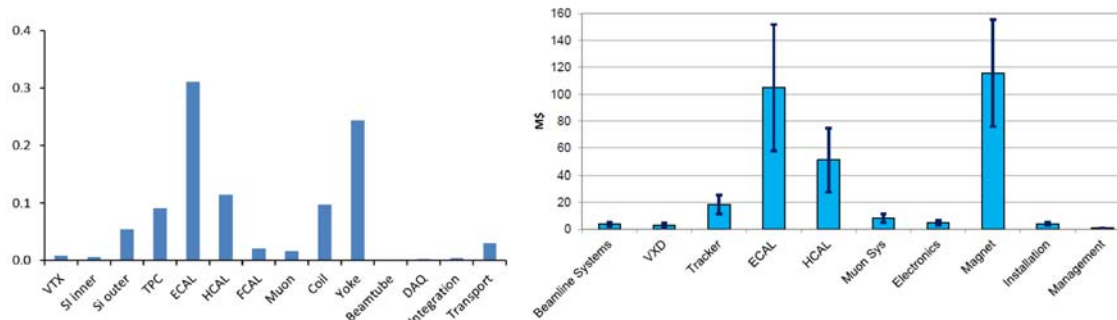


図 II-7-3 サブディテクターの物件費のコスト評価。ILD（左）は割合で、SiD（右）は 100 万ドル単位で表してある（出典：ILC-TDR）

測定器の建設コストを考える際には、測定器に対する予算措置の形態が加速器とは異なる点に留意すべきである。測定器提案の公募、審査および採択の手続きは ILC 計画の承認後に改めて行われると想定される。提案の審査にあたっては、測定器の性能のみならず、その建設コスト、実験提案グループの予算獲得能力も勘案されると予想される。これは、今までの国際協力大型加速器実験の通例に従い、加速器を建設・運営する中央研究所は一部の例外を除き測定器建設費用を原則として負担せず、測定器建設予算の大半が実験に参加する多くの大学・研究機関それぞれの財政当局から個別に獲得されることが想定されるためである。その結果、測定器設計の最終的最適化は与えられた予算制限の中で行われ、性能向上を狙うあまり建設予算が膨張するということはないと考えられる。

3) TDR 以降の進展

TDR の完成以降も各サブディテクターの研究開発や、測定器システムの最適化のための設計変更の可能性も含めた検討が ILDC、SiD とともに進められている。現在の研究開発の第一の目標はサブディテクターおよび測定器システムのさらなる性能向上に向けられている。さらに、実機を製作する際の実装技術（測定器冷却技術など）の研究開発も行われている。

加速器の場合、コンポーネントの性能向上（例えば加速勾配の増加）は直接、建設コストの削減につながるが、測定器の場合、性能の向上が必ずしも建設コストの削減には直接結びつかない。しかし、測定器の性能向上は得られる素粒子物理学の成果の向上につながり、ILC 全体のコストパフォーマンスの向上につながると言える。

4) コスト削減が見込まれる研究開発

すでに述べたように、測定器に関連する研究開発のうち、実際の粒子検出に関わるサブディテクターに関しては、更なる性能向上に主眼が置かれており、コスト削減に直結するような研究開発には力が注がれていない。しかし、粒子検出に直接関わらない超伝導電磁石に関してはいくつかのコスト削減が見込まれる新技術の研究開発が提案されている。図 II-7-3 からわかるように、超伝導電磁石（Coil+Yoke、あるいは Magnet）は測定器全体のコストの中で大きな割合を占めており、この部分のコスト削減は測定器全体のコスト削減に効果的と言える。具体的に提案、あるいは着手されている項目として、鉄リターンヨークの鉄の量の削減および新しい超伝導線材の開発の 2 項目が挙げられる。ただし、これらは、最近になって提案されたものであり、コスト削減の効果の評価についてはさらなる精査が必要な段階である。また、今後の研究開発の進展に伴い、新たなコスト削減効果のある研究課題が見出される可能性もある。

(1) 鉄リターンヨークの鉄の量の削減

ILC においては 2 台の測定器が交代で実験を行う。片方の測定器が衝突点に設置され、実験を行っている間、もう一方の測定器は少し離れた位置（中心軸間距離で 28 m）でメンテナンス作業を行うか、待機の状態となる。このメンテナンス作業を行う際に危険を生じないように、実験中の測定器の超伝導電磁石からの外部への漏れ磁場に対して、ビームラインから 15 m 離れた位置で 50 ガウス以下という要件が課された。測定器内部の飛跡検出領域空間に 3.5 T (ILD) ないしは 5 T (SiD) の強力な磁場を作りつつこの要件を満たすためには大量の鉄を用いたリターンヨークが必要となる。TDR 以降、なるべく少ない鉄の量で漏れ磁場を抑えられるようなリターンヨークの検討がシミュレーションによって行われてきた。SiD グループでは、測定器の両端のエンドキャップ部と中央部のバレル部との接続をビーム軸に垂直方向の平面から階段状に設計変更を行うことで漏れ磁場を減らすことを検討している。一方、ILD グループではさらに大胆な設計変更を何通りか検討している。その中で、最も実現性がありそうで、かつ大幅なコスト削減が見込めそうな方法は、単純に鉄の量を減らし、それによって増加した漏れ磁場を ILD と SiD の間に分厚い鉄の壁を設置してシールドしようというものである^[II-7-1]。

(2) 新しい超伝導線材の開発

TDR において、測定器の超伝導電磁石に用いられる超伝導線材は、ILD、SiD とともに LHC 実験の一つである CMS 測定器に用いられた線材と同じ構造を持つものがベースラインとして採用された。この構造は、中心部の超伝導体である NbTi と銅から成るラザフォードケーブルを高純度アルミの安定化材で囲み、さらにその外側を高強度のアルミ合金で補強したものである。高純度アルミとアルミ合金は電子ビーム溶接によって一体化される。この方式では電子ビーム溶接の工程が入るために、その分、コストと工期が増加する。CMS に用いられた線材に替わるものとして、安定化材を高純度アルミより強度のある Al-Ni にして、補強用のアルミ合金をなくしたデザインが提案され^[II-7-2]、実際に研究開発も行われている^[II-7-3]。さらに挑戦的なアイデアとして、銅の比率を高めたラザフォードケーブルを採用し、その代り安定化材としてはアルミ合金を使用するデザインも提案されている^[II-7-4]。これら二通りの方法はどちらも工程が減ることによるある程度のコストの削減効果が見込まれる。

参考文献

- [II-7-1] ILD Yoke/Coil Alternatives, Uwe Schneekloth, talk given at Mini-Workshop on ILC Infrastructure and CFS for Physics and Detectors, Sep.2017
- [II-7-2] Conceptual Design of the ILD Detector Magnet System, F.Kircher, et al., LC-DET-2012-081
- [II-7-3] Characterization of a Large Size Co-Extruded Al-Ni Stabilized Nb-Ti Superconducting Cable for Future Detector Magnets, S.A.E.Langeslag, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.23, 4500504
- [II-7-4] Desired Action Plan of Solenoid + Anti-DID during Preparation Phase, T.Okamura and Y.Makida, talk at ILD Workshop, Sep. 2016

III. コスト削減効果

1. コスト削減の評価

TDR で使用しているコスト（2012 年 1 月時点のコスト）から、新しい研究開発によってどの程度コスト削減できるかを評価した。機器ごとにコスト算出の方法が異なり、また、TDR では GDE (Global Design Effort) による国際的な見積もりを利用しており、現時点での物価変動や為替変動を個々の要素に繰り込むのは容易ではないためである。

II 章でサーベイした結果より、以下の項目について、TDR からのコスト削減と、研究開発に必要な期間および費用について評価を行った。

- 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化
- 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理（N-Infusion）
 - N-Infusion 活用のための高周波系の研究開発（高電界運転に向けて）
- 入力カプラ
- 電解研磨
- 超伝導薄膜
- 液圧成形
- DR および RTML での永久磁石の利用
- 加速器土木のコスト削減
 - 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更
 - ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更
 - 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化
 - 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化
- 測定器のコスト削減
 - リターンヨークの鉄の量の削減に関する研究開発
 - 新しい超伝導線材の開発

ここでは、研究開発の成否（ILC に適用できるかどうか）を評価する期間と費用を見積もっている。新しい技術を用いた研究開発であるため、研究開発の成否だけでなく、成功した場合のコスト削減の効果についても不確実性があることには留意が必要である。結果として、想定していたコスト削減に至らない可能性もあるため、ここでは最大限のコスト削減効果を含めて幅を持って評価している。また、ここでは研究開発による削減効果には、研究開発に必要な費用は含まれていない。

今回の研究開発として取り上げた項目は、いずれも世界中で研究開発が進められつつあるものである。ここでは、グローバルな研究開発の中で日本国内で取り組む部分の期間と費用を提示している。実際のコスト削減の研究開発の成功のためには国際的な協力が前提となっている。

多くの空洞や入力カプラを利用する超伝導加速器部分は、ILC に適用できる場合も、量産化について別途検討が必要である。ILC 建設の準備期間では、システムのプロトタイプを作って量産化を評価することが考えられており、今回の研究開発の費用には含まれていない。

大量生産においては、生産性の向上もコスト削減に大きく寄与する。TDR においては、ラーニングカーブなどにより大量生産の効果を取り込んでいるが、本調査研究においては具体的な大量生産によるコスト削減効果については調査の対象としていない。

また、常伝導リニアコライダーとプラズマ加速についても検討を行っている。

2. DR および RTML, BDS での永久磁石の利用

1) ダンピングリングでの可能性

ILC ダンピングリングでの主な電磁石のリストを表 III-2-1 に示す。ここで永久磁石の磁場極性を変える機構は容易ではないことから、正負両極性が必要な磁石、つまり Dipole Corrector（ステアリング磁石）やマッチング調整用磁石は対象外と考える。また、六極以上の多極磁石では永久磁石化することが複雑であること、ウィグラーは要求性能を得るために超伝導電磁石が検討されていること、キッカーはナノ秒の高速パルスであることから本評価では対象外とする。

表 III-2-1 ダンピングリング（1 リングあたり）の電磁石一覧（出典：ILC-TDR）

Magnet	Type	Eng. Style	Qty	Power Method
Dipoles:	Corrector	D60L250	304	Individual
	Chicane	D60L940	28	String
	Disp. Supp.	D60L1940	10	String
	Arc	D60L2940	150	String
Quadrupoles:	Arc	Q60L480	482	Individual
	Straight	Q60L700	121	Individual
	Wig/Inj/Ext	Q85L309	50	Individual
	Wiggler	Q85L600	30	Individual
Skew Quads	Corrector	Q60L250	158	Individual
Sextupoles	—	SX60L250	600	Individual
Wigglers	—	WG76L2100	54	Individual
Kickers	Inj/Ext	Striplines	42	Individual
Thin Pulsed Septa	Inj/Ext	—	2	Individual
Thick Pulsed Septa	Inj/Ext	—	2	Individual

ダンピングリングの偏向電磁石は、長さ 3 m、平均磁場強度は 0.23 T であり、電子および陽電子のリング（ルミノシティアップグレード前の 2 リング）で計 300 台設置される。これに対し、ESRF-EBS の偏向磁石（II-3 節に記述）は、全長 1.8 m、磁場強度を 0.17 T から 0.67 T まで段階的に変えた 5 連の固定式永久磁石ユニットで構成されており、既に量産が進んでいる状況にある。また、磁場強度可変式の偏向磁石では、SPring-8 試作機^{III-3-3]}において、磁極ユニット長 0.1 m、磁場 0.12 T、可変幅 93.4%が得られている。ILC ダンピングリングおよびバンチ圧縮機までの RTML におけるビームエネルギーは一定（5 GeV）であり、磁場強度の可変性は、永久磁石の個体差や放射線ダメージを補償する範囲を確保すれば良い。ここで放射線ダメージは、放射光施設の挿入光源などビームから数 mm の位置にある永久磁石で確認されているものであり、ILC-DR は磁極間隔 60 mm であることから影響は小さいと見られる。永久磁石によるダンピングリング用偏向磁石の研究開発は十分価値のあるものと考えられる。TDR で設計されている偏向磁石の磁場強度分布を図 III-2-1 に示す。多くが 0.5 T 以下の比較的弱い磁場であり、安価なフェライト系永久磁石を採用できる可能性がある。

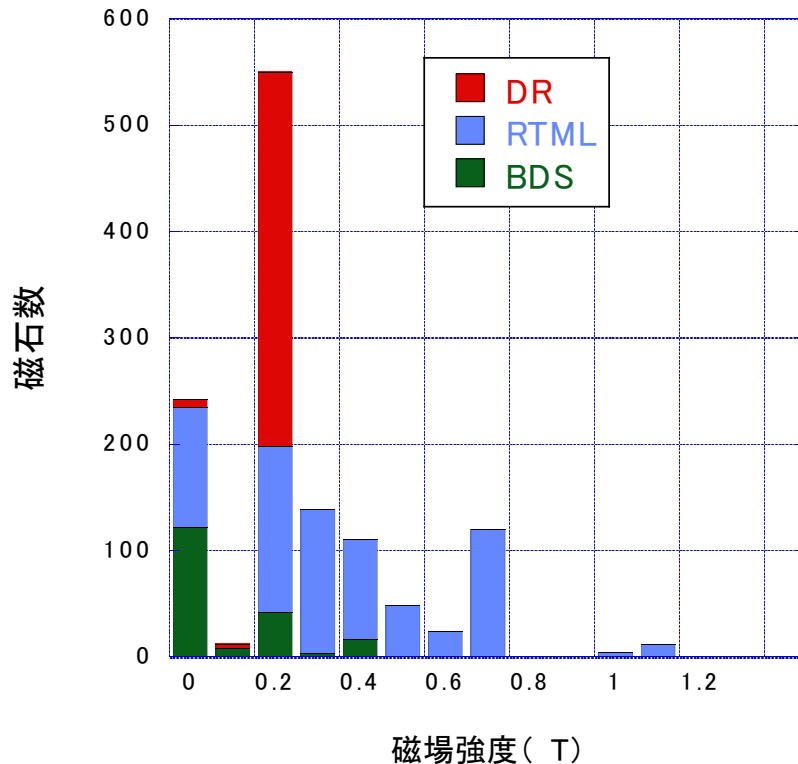


図 III-2-1 TDR における偏向磁場強度分布 (出典：ILC-TDR)

四極電磁石については、磁場強度を変える際に磁場中心が動いてしまう影響を見極める必要がある。ダンピングリングでの四極磁石のアライメント許容誤差は $50\ \mu\text{m}$ であるが、更に精密な **Beam Based Alignment** から要求される磁場中心の安定性など、低エミッタンスビーム調整に支障が無いことが求められる。一方、真空チェンバーを組み込む際の条件も考慮されなければならない。特にアーク部では、各種磁石が密に配置されること、偏向磁石からの放射光をアブソーバーまで逃がす構造が必要なことから、真空チェンバーはアーク部のセルにわたって一体で製作されることが多い。その場合は、インストール時に磁石を半割りする必要が生じる。磁場強度を可変とする機構と共存する設計を行い、試作による性能評価を行う必要がある。前述の ESRF-EBS 計画ではアーク部の四極及び六極磁石は従来型の電磁石を採用している。

表 III-2-2 は TDR におけるダンピングリングのシミュレーションで仮定されている磁場誤差を示したものである。偏向電磁石および四極電磁石については、磁場強度の相対誤差として 2×10^{-4} が仮定されている。これは SPring-8-II 計画^[III-3-2]での要求性能 5×10^{-4} とほぼ同程度であるが、表 III-2-2 の値は SLAC の電子・陽電子衝突型加速器である SPEAR や PEP-II で得られた電磁石の実績に基づく値であり、そのまま許容値を意味するわけでは無い。ダンピングリングの許容値は、これらよりも大きい可能性がある。

表 III-2-2 ダンピングリングで仮定した電磁石性能(出典：ILC-TDR)

Type	Unit	Max Field Max KL	Error
Dipoles	mrاد	41	2×10^{-4}
Quadrupoles	m^{-1}	0.35	2×10^{-4}
Sextupoles	m^{-2}	1.23	2×10^{-4}
H correctors	mrاد	2	5×10^{-3}
V correctors	mrاد	2	5×10^{-3}
Skew quads	m^{-1}	0.03	3×10^{-3}
Wigglers	–	–	3×10^{-3}

2) RTML での可能性

RTML は主線形加速器に併走するビームラインを含め、ダンピングリングから主線形加速器までの長いビームラインであり、非常に多くの偏向磁石と四極磁石が使われることになる（表 III-2-3）。

表 III-2-3 電子・陽電子 RTML の主な装置一覧（出典：ILC-TDR）
Bends, Quads, Dipoles は電子/陽電子ラインを示す。

Magnets		Instrumentation		RF	
Bends	336/356	BPMs	782/752	Cavities	440
Quads	825/793	Wires	12	Cryo-Mod.	51
Dipoles	1229/1157	BLMs [†]	2	RF sources	17
Kickers	18	OTRs	5	S-band struct.	2
Septa	14	Φ monitors	5	S-band sources	2
Pulsed bends	3	Xray SLMs [‡]	1		
Extr. bends	12	Rect. Coll.	10		
Rasters	6	Circ. Coll.	14		
Solenoids	4				

[†] Bunch Length Monitor

[‡] Synchrotron Light Monitor

RTML の設計では、偏向磁石の 80%ほどが 0.5 T 以下に、残りが 1 T 程度（最大 1.2 T）に設定されている。これは、永久磁石で問題なく達成できる強度である。四極磁石について、ダンピングリングでは真空チェンバーのインストールにおける半割の問題があったが、RTML では磁石間隔が大きいため、あらかじめ短い真空チェンバーを磁石に組み込むなどの対応が可能であり、この問題は無いと考える。一方、RTML でのビームを使った位置調整（Beam Based Alignment）から要求される四極磁場中心に対するビーム位置モニターのアライメント誤差が $7 \mu m$ と厳しい。磁場強度を変えた際の磁場中心移動を抑えた磁石の研究開発が必要である。RTML で仮定されている磁石の強度誤差は、偏向磁石 5×10^{-3} 、四極磁石 2.5×10^{-3} である [III-2-1]。

3) BDS での可能性

基本的な研究開発項目は DR や RTML と同じであるが、BDS は主線形加速器の下流に位置するため、

ビームの設定エネルギーに応じて磁場強度を変える必要がある。例えば衝突エネルギーが 500 GeV から 1TeV になることを想定すると、単純に磁場強度を 2 倍にできる可変性が必要となる。BDR で仮定されている磁石の強度誤差は、偏向磁石 1×10^{-2} 、四極磁石 5×10^{-4} である[II-5-1]。

4) コスト削減の評価

電磁石と永久磁石とを比較した場合、以下の項目は共通または対等と考えられる。

- 1) 磁極およびリターンヨークの大部分。
- 2) ビームラインへの設置構造、アライメントのための構造。

したがって、電磁石、永久磁石、それぞれ次に挙げる項目の合計が比較すべき対象である。

- 電磁石：コイル（冷却水取り回しを含む）、DC ケーブルおよび DC 電源（設置作業を含む）、インターロックセンサー（温度、流量等）。
- 永久磁石：永久磁石（素子）、駆動機構（制御を含む）、温度および磁場モニター。

磁場モニターについて、常設とするためにはモニターの仕組み、精度の検討を要する。必要に応じて測定する場合であれば NMR 等の利用[II-3-4]が考えられる。磁場モニターを常設しない場合、電磁石と永久磁石の差は駆動機構のコストに依存する。駆動機構については、研究開発により磁場強度と安定性から設計が決まるものであり、現段階でのコスト評価は難しいが、上記の比較から、おおよそ永久磁石の合計は電磁石の合計を下回るものと推測する。そこで、現時点でこれらは相殺するものと仮定し、運用コスト（主に消費電力）の差をコスト削減分として見積もる。保守に関わる経費は本評価では省略する。永久磁石はほとんど電力を消費しないため、電磁石における消費電力を計上する。以下は常伝導電磁石に関わる消費電力（冷却水および空調分を含む）の TDR 評価での合計である。ただし、BDS についてはビームエネルギー 500 GeV（衝突エネルギー 1 TeV）までの拡張を評価した値である。

DR 偏向電磁石	3.5 MW	(2.6 億円**)
DR 四極電磁石	0.8 MW	(0.6 億円**)
RTML 偏向電磁石	3.9 MW	(2.9 億円**)
RTML 四極電磁石	0.8 MW	(0.6 億円**)
BDS 偏向電磁石	3.1 MW	(2.3 億円**)
BDS 四極電磁石	7.5 MW	(5.6 億円**)

**年間 5,000 時間、15 円/kWh とした場合。

偏向磁石のみの合計は 10.5 MW となり、年間の電気代で最大約 7.8 億円の削減効果となる。さらに全ての四極磁石も永久磁石とした場合では、合計 19.6 MW、最大で年間 14.7 億円の削減が見える。これに加えて保守経費の削減など運用上の効果は大きい。

5) 研究開発に必要な期間および費用

研究開発については、設置場所の空間的制限を考慮しつつ、磁石の試作と性能試験、改修による試験を行うことが必要となる。偏向磁石および四極磁石について、それぞれ要求磁場強度として標準的な磁石と最大の磁石を試験する。

試験期間：3 年

試験費用：5,000 万円

参考文献

- [III-2-1] A. Latina, “ILC RTML overview,” Talk at IWLC 2010, Geneva, Switzerland 2010, <http://ilcagenda.linearcollider.org/materialDisplay.py?contribId=330&sessionId=77&materialId=slides&confId=4507>

3. 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化

1) はじめに

ニオブ (Nb) 材料費は、TDR で見積もられた全体コスト見積もりの 5~6% を占める。このため、重要な検討候補となる。超伝導加速空洞の高性能化を堅持しつつ、材料費のコスト削減を実現する方策として、以下の 2 点に着目する：

- Nb 材料精錬過程における「純度および残留抵抗比 (RRR: Residual Resistivity Ratio)」の最適化
- Nb 精錬後のインゴットからの「直接切り出し法」による空洞用ディスク材の製造

超伝導加速空洞の熱負荷および電界などの特性・性能は、Nb 材料の RRR に依存する。電子ビーム溶解法による精錬を繰り返すことで RRR を高めることができるが、性能／コストの最適化を図る必要がある。また精錬されたインゴットからマルチ・ワイヤーソーを用いた直接スライス法によりディスクを切り出すことで、不純物の巻き込みが極めて低くなり、表面の清浄度を保つことができる。技術課題としては、インゴットが持つ大結晶粒界 (LG: ラージ・グレイン) サイズが、切り出されたディスクに直接反映されることによる、機械的特性の不均一性のため、ハーフセル・プレス成型過程においての歪みが大きくなりやすい点である。これは、プレス成型過程前に、予め歪み抑制のための熱処理工程を組み込むことで改善される。

コスト削減の観点からは、RRR 値の最適化による精錬コストの低減、およびインゴットから直接ディスクを切り出すことで、従来工法での鍛造、圧延、機械研磨工程を省くことができるため、大幅なコスト削減が期待される。従来との工程比較を表 III-3-1 および図 III-3-1、図 III-3-2 に示す。

表 III-3-1 工程の比較

工程	従来・工法 (FG)	コスト削減・工法 (LG)
インゴット製造：電子ビーム溶解・精錬 →残留抵抗値 (RRR)	≥ 300	≥ 200 , 平均：～ 250
インゴット →ディスク成型	鍛造→圧延 →機械研磨 →シート・カット	直接ディスク 切り出し
表面仕上げ	化学研磨	化学研磨
結晶粒界 (Grain)	Fine (< 1 mm)	Large (5~10 cm)

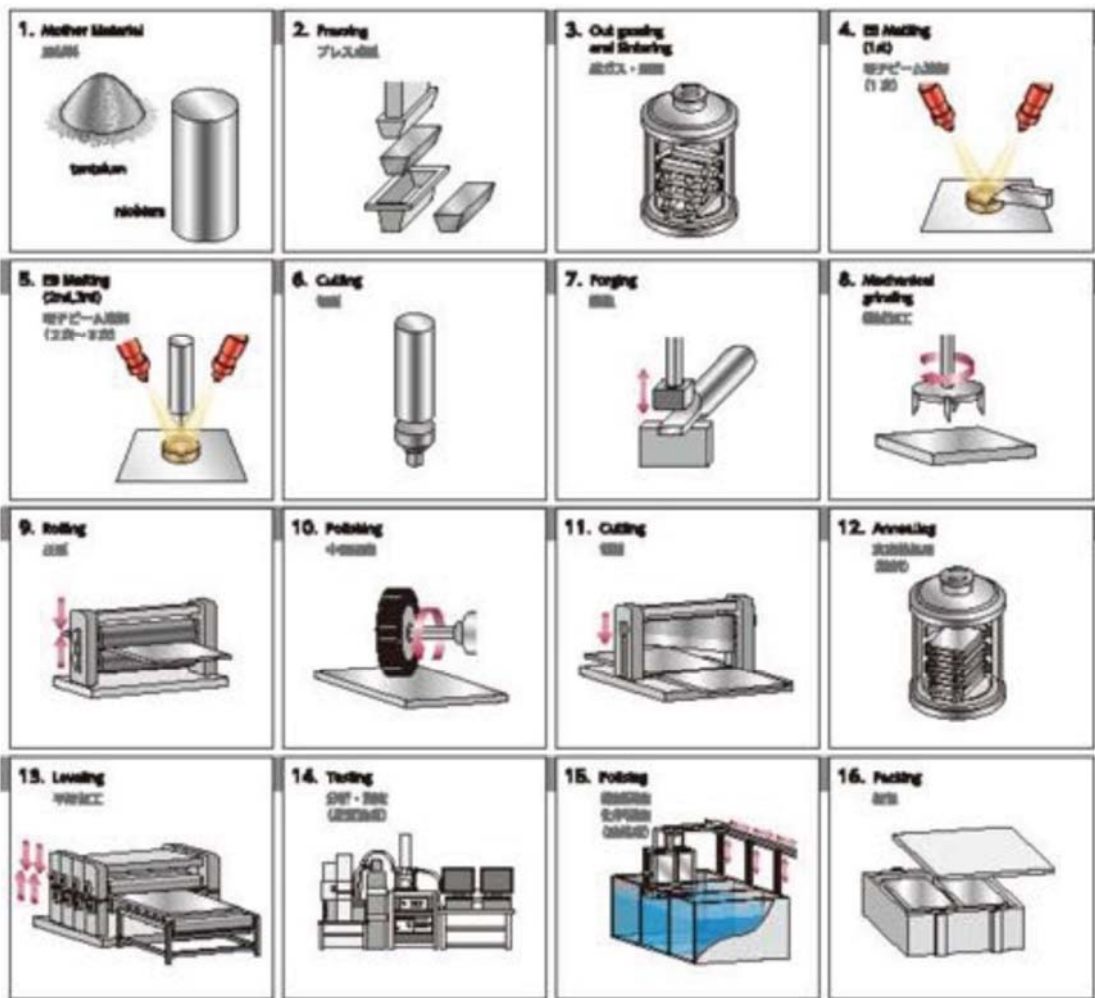


図 III-3-1 超伝導加速空洞用ニオブ板材料の製造過程 (出典：文献 III-3-1)

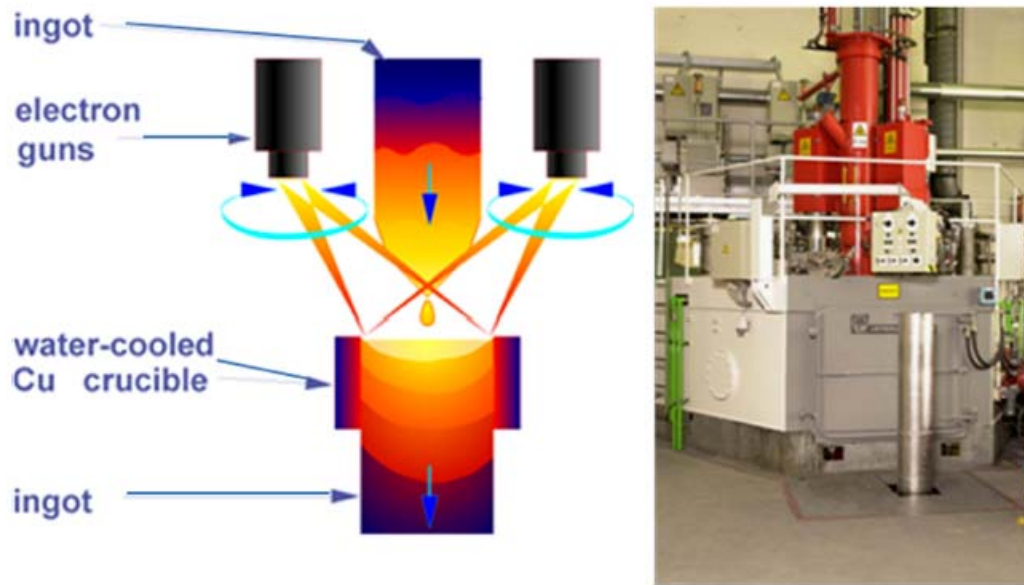


Fig. 6. Schematic of drip melting in an electron beam melting furnace (left) and furnace at W.C. Heraeus (right).

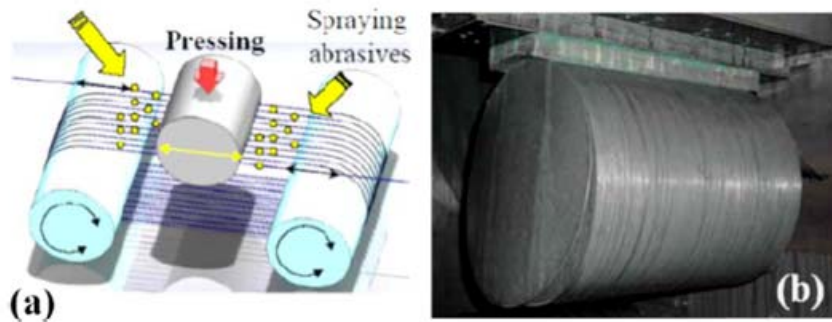


Fig. 7. (a) Schematic of multi-wire slicing and (b) actual slicing arrangement at TD [70].

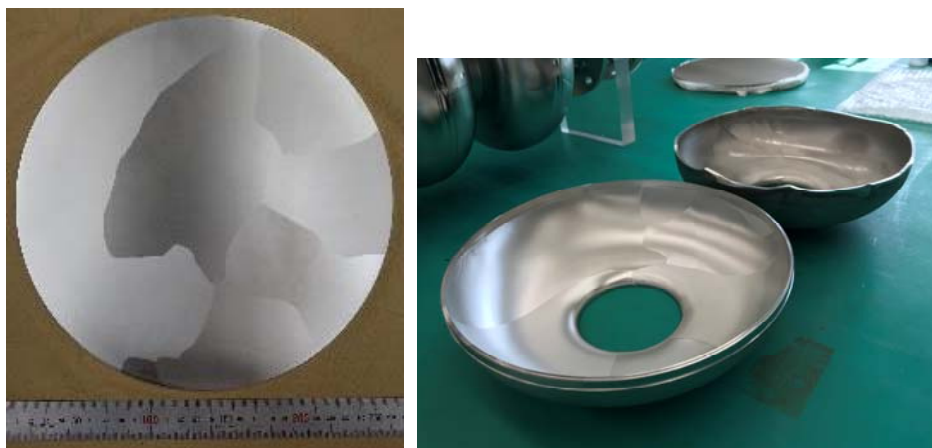


図 III-3-2 圧延工法とスライス工法の比較 (出典：文献 III-3-2)

2) 技術開発の実績（国際、国内）

基礎開発レベルでは、DESY、ジェファークソン研究所、KEK 等、各国の研究所で技術検証が積み重ねられている[III-3-2,3,4]。DESY では、9-cell 空洞での試作・評価とともに、クライオモジュール（8×9cell 空洞）への組み込み・運転実績がある（図 III-3-3）。図 III-3-4 に KEK の空洞製造施設（CFF）にある製造設備を、また図 III-3-5 に KEK での LG 空洞の性能結果を示す。

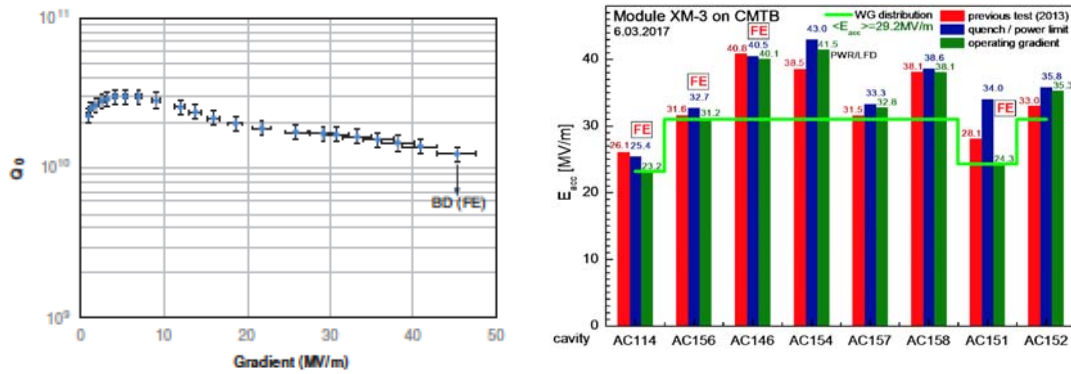


図 III-3-3 DESY における LG 空洞の電界・Q 特性および DESY の自由電子レーザー開発施設 FLASH におけるクライオモジュール運転実績



図 III-3-4 KEK の空洞製造施設（CFF）

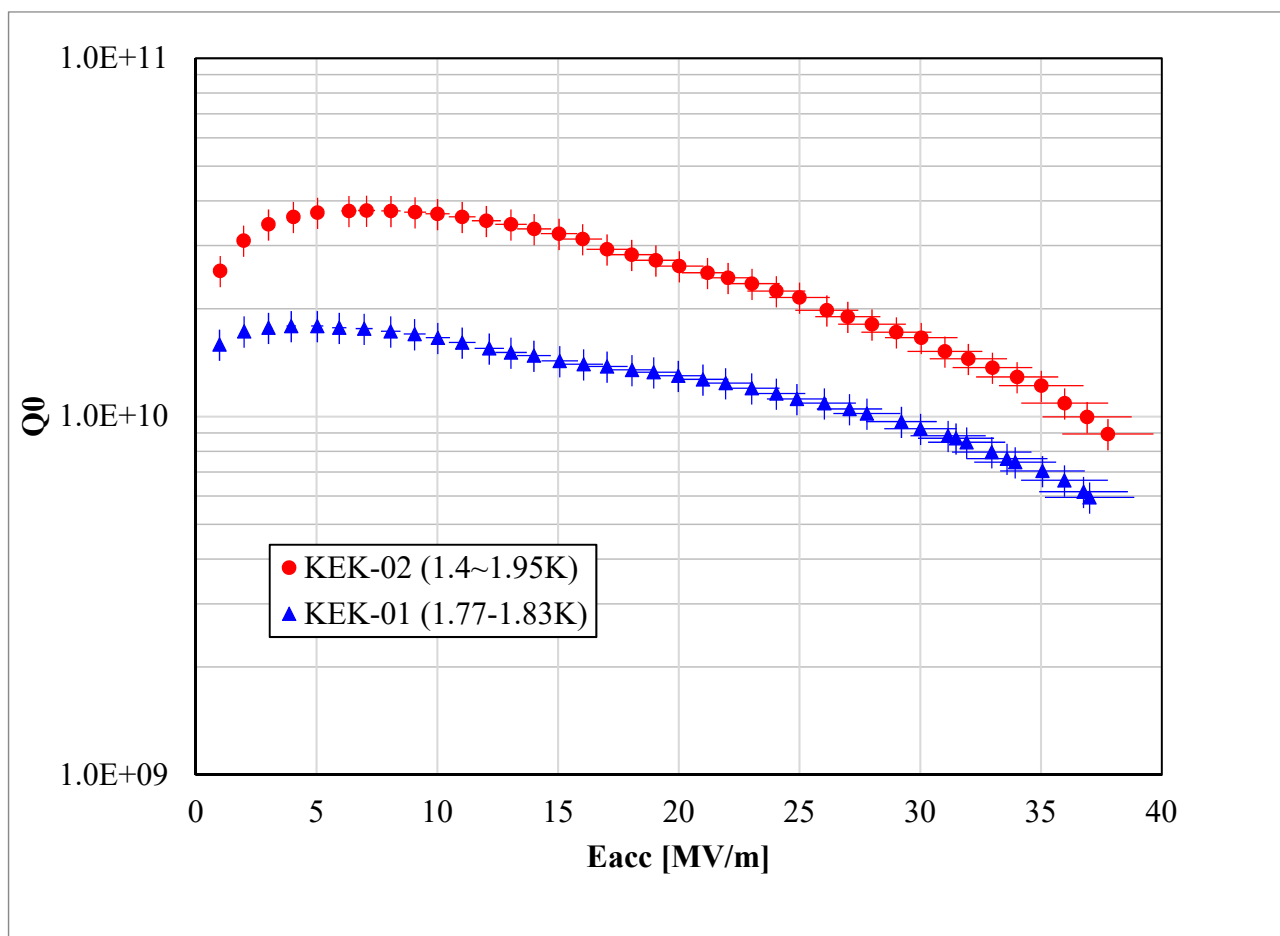


図 III-3-5 KEK で試作された KEK-01（ファイングレイン（FG））、KEK-02（LG）
空洞性能の比較（出典：文献 III-3-5）

これらの開発を通して、LG インゴット直接切り出し法による空洞性能は、FG に対して、同等以上の性能を有しており、今後の加速器計画での量産実用化に注力すべき段階であると言える。量産に向けた課題は、機械的な特性の不均一性を乗り越えた機械加工・組み立て性能の向上、高圧ガス圧力容器として整合する製造法の確立にある。

3）コスト削減案に基づく Nb 材料特性要求

上記のコスト削減基本方針のもと、超伝導加速空洞・Nb 材料に求める特性を以下の通りまとめる。

技術仕様：

- 超伝導材料： 純ニオブ材
- 基本成分： ASTM B393 に準拠、（但し、Anneal (> 750℃後)。

残留物	C	N	O	H	Zr	Ta	Fe	Si	W	Ni	Mo	Hf	Ti	S
基準・上限 [wt-ppm]	30	30	40	5	100	1300	50	50	70	30	50	50	50	10
参考 (欧州・XFEL)	10	10	10	2	--	500	30	30	70	30	50	--	50	--

- 残留抵抗比： RRR (R-295K/R-4.2K) : > 200 , 平均 : > ~ 250
- 結晶粒界： < ~10 μm
- 機械強度： 引っ張り強度 $\geq 140 \text{ MPa}$, 降伏応力 $\geq 40 \text{ MPa}$
- 硬度： Hardness $\leq \sim 60$ (参考)
- 板寸法： 直径 $\geq 260 \text{ mm}$ (インゴット表面仕上げ後) , 厚さ : 2.8 mm (+/- 0.1 mm)
- 平面度： $\leq 2\%$ (直径に対して)
- 表面処理： 化学研磨および洗浄
- 表面粗度： $R_y \leq 15 \mu\text{m}$
- 数量： (総数)

空洞数 [n]	ディスク総数 $18 \times n$	Ingot 数* (@ L=450 mm)*	インゴット総重量 [ton]
18,000	324,000	2,100	420

* インゴット長 450 mm (L)は、一度にスライス可能な1ユニット長 (200 kg/unit), 1 インゴットから 155 枚のディスクが切りだせると仮定。

製造方法

・Nb 原材料を、電子ビーム溶解による複数回の精錬後、製造されたインゴットから多連ワイヤーソー等によって直接スライスする方式を基本とする。インゴットの鍛造、圧延、機械研磨などの工程で巻き込み得る不純物、また微細なボイドなどを極力抑制し、表面清浄度を追求した製造法とする。

4) コスト削減の評価

Myneni の文献[III-3-4]には、材料コストが 50%低減できるとの記述がある。また、Kneisel の文献[III-3-2]では、圧延から研磨・切断の工程が省略可能との記載がある。KEK では、さらに定量的にコスト削減効果を評価するために以下の製造コストおよび性能比較評価を進めている。本調査でのコスト削減案が実現できた場合は、TDR での Nb (および NbTi) 超伝導材料コスト評価に対して、超伝導加速空洞セル (本体) 部で、25~50% 、端部構造など (ビームパイプ、フランジ、補強リングなど) を含む全体として、20~40% 程度のコスト削減効果を期待する。NbTi 製のフランジについては製造法の再検討によりコスト削減の可能性がある。さらなる空洞材料のコスト削減については、原材料コストやスライスコストについての実績調査が必要である。

表 III-3-2 エ工法及びコスト比較

	TDR 基準	従来工法	コスト削減工法
研究開発・モデル名：	TESLA	R7/R7b	R10/R10b
工法	鍛造・圧延・研磨	鍛造・圧延・研磨	直接スライス
Sheet/Disk Grain Size:	Fine Grain	Fine Grain	Large Grain
RRR	250 ~ 300	250 ~ 300	250 ~ 300
セル数	9	3	3
性能評価：			
最大電界	35 MV/m	30/36 MV/m	準備中
最大 Q 値	0.8×10^{10}	$1.65/1.7 \times 10^{10}$	準備中
中央空洞セル・コスト：	(~2.2)	(~2.07)	(~1.1)
インゴット製造	1.0	0.87	0.9

ディスク製造 端部接続部等・コスト：	1.2 (~ 0.5)	1.2 (~ 0.4)	0.2 (~ 0.4)
-----------------------	----------------	----------------	----------------

5) 研究開発に必要な期間および費用

LG, RRR= 250 ディスク 100 枚以上を入手し、これを用いて以下の空洞を試作し、性能およびコスト評価を行う。

- 3-cell 空洞：4 台
- 9-cell 空洞：4 台（このうち 1 台については高圧ガス法規対応とし、将来的に STF-2 加速器に組み入れることも目指す。）

開発計画は表 III-3-3 の通りである。

表 III-3-3 研究開発計画

	JFY2017	2018	2019
3 セル空洞 (4 台)	製造	評価	
9 セル空洞 (4 台)		製造	評価

このコスト削減研究開発の中で注力すべき技術課題は：

- RRR を若干緩和することによる空洞性能（Q 値、電界等）への影響評価
- LG の機械的特性の不均一性を克服した成形、組み立て技術
- 高圧ガス法規対応（強度試験再評価を含む）

などである。これらの研究開発を進めるには、3 年間で 1.3 億円程度の研究開発費が必要と考えられる。

参考文献

- [III-3-1] H. Umezawa, “SC Cavity: Production of high purity niobium material for SRF cavities”, Lecture at ASSCA2017, <http://www-conf.kek.jp/assca/>
- [III-3-2] P. Kneisel et al., “Review of ingot niobium as a material for superconducting radiofrequency accelerating cavities”, NIM A Volume 774, 21 February 2015, Pages 133-150.
- [III-3-3] W. Singer et al., “Development of large grain cavities”, Physical Review STAB, Volume 16, 012003 (2013).
- [III-3-4] G. Myneni, “Past, Present and Future Prospects of SRF Ingot Niobium Technology”, Future Circular Collider Week 2015 Washington DC, USA March 24, 2015.
https://indico.cern.ch/event/340703/contributions/802071/attachments/668660/919075/Myne ni_FCC2015.pdf
- [III-3-5] T. Dohmae, et al., “Investigation of in-house superconducting radio-frequency 9-cell cavities made of large grain niobium at KEK”, NIM A, Volume 875, 11 December 2017, Pages 1-9

4. 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理（N-Infusion）

1) N-Infusion の概要

（1）N-Infusion について

N-Infusion（窒素インフュージョン）の技術は、米国のフェルミ研究所にて開発された [III-4-1]。詳しくは後述するが、超伝導加速空洞の処理工程の一つに加熱真空炉における 800℃、3 時間の高温熱処理による脱ガス・応力除去の工程がある。この熱処理後の冷却中に 120℃、48 時間の間 25 mTorr（3.3 Pa）程度の窒素を真空炉に導入する工程を加え、ニオブ製空洞の表面（10 nm 程度）に微量の窒素を拡散させることにより、加速勾配・Q 値ともに向上させる事ができる。

図 III-4-1 に、フェルミ研究所にて取得された、1.3 GHz 単セル空洞に対して N-Infusion 技術を適用した際の空洞性能を示す。ILC 用の標準的な表面処理を行った空洞と比較して、加速勾配で約 10%、Q 値で約 2 倍（35 MV/m）の性能向上を示す実験結果が得られている。

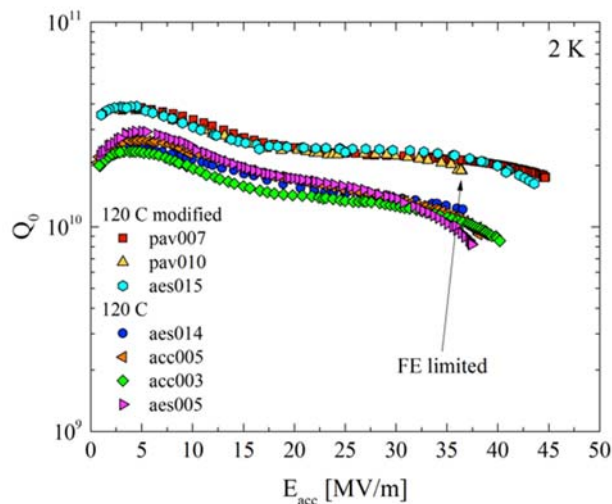


図 III-4-1 N-Infusion を行った 1.3 GHz 単セル空洞の性能。図中 “120 C modified” と書かれた空洞が N-Infusion を適用した空洞。“120 C” と書かれた空洞が ILC の通常処理が施された空洞。図中の “FE limited” は電界放出による性能制限。（出典：文献 III-4-1）

加速勾配の向上は、直接、空洞台数、クライオモジュール台数、入力カップラや周波数チューナー等の関連コンポーネントの台数の削減に結び付く。また、Q 値の向上はすなわちヘリウム負荷の低減であるので、冷凍機の冷凍能力を削減することに繋がる。

ここに示した結果は、単セル空洞へのものであるが、9 セル空洞への適用でも同様の性能向上が得られ、クライオモジュールへのインストール後も性能を維持できれば、ILC のコスト削減に大きく寄与することができる。

（2）N-Infusion の場合の全体工程

ILC 用の標準的な表面処理レシピと N-Infusion の場合の工程の違いを図 III-4-2 に示す。標準処理の詳細については、TDR Volume3 Part-II の 3.2.2 章を参照のこと。

電解研磨後の熱処理の際に、120℃の温度で真空炉を保持し 3.3 Pa の窒素を導入して 48 時間維持する。N-Infusion は、空洞表面 10 nm 程度のごく浅いところに影響を与える処理方法なので、電解研磨などのなんらかの研磨処理を施すと N-Infusion の効果は消失して元の電解研磨表面に戻ってしまう。N-Infusion の場合には、仕上げの 20 μm 電解研磨工程が無い（行えない）というところが、標準処理工程と大きく異なる点である。

電解研磨の工程が 1 回省けるというのはコスト的にはメリットがある反面、全ての工程における空洞の取り扱いを非常にシビアに行わなければならない、という点で品質管理（quality control）が非常に重要になる。



図 III-4-2 ILC 用の標準表面処理レシピと N-Infusion の場合の工程の比較

特に、熱処理工程は重要な工程となる。標準処理レシピにおいては、熱処理の際に空洞表面が汚染されていたとしても、その後の仕上げ 20 μm 電解研磨で滑らかな表面を出すことができるが、N-Infusion においては、熱処理工程後の表面の良し悪しがあるまま空洞性能に直結する。熱処理中に空洞表面を汚染することのないよう、熱処理前後の空洞の取り扱い、ならびに常に加熱真空炉自体を清浄な状態に保つことが必要である。

ちなみに、これらの空洞・真空炉の清浄な状態での取り扱い方法が確立できれば、通常処理レシピの際にも、仕上げ 20 μm 電解研磨を省くことは原理的に可能となる。

（３）N-Infusion の手順

既に述べたように、熱処理の際の空洞表面の汚染は性能劣化に繋がるので、避けなければいけない。仮に異物が空洞内に混入した状態で熱処理を行えば、空洞表面に溶解固着して空洞性能に悪影響を与えるであろうことは容易に想像できる。

N-Infusion の処理前の空洞は、必要に応じて超音波洗浄等を行った後に、高圧超純水洗浄を行い、そのままクリーンルームにて乾燥・パッキングを行い、真空炉まで移動させる。その様子を図 III-4-3 の左図に示す。

真空炉も清浄度を保つために、クラス 10,000 程度のクリーンブース内に設置されることが一般的である。よりクリーンな環境を保持するために、クリーンルーム内に真空炉を設置する場合もある。

超伝導加速空洞への油脂成分（有機物あるいはハイドロカーボン）の付着を防ぐため、加熱真空炉もオイルフリーの真空排気系が必須である。クライオポンプ等を用いて、 1×10^{-7} Pa 程度の到達真空圧力を目標とした真空炉が、N-Infusion には用いられている。



図 III-4-3 （左図）クリーンルーム内でパッキングされた単セル空洞。（右図）真空炉へインストールする際に、Nb 製キャップならびに Nb フォイルでフランジを覆われた単セル空洞。

真空炉に持ち込まれた空洞は、クリーンブース内でパッキングを解かれ、真空炉内にインストールされるが、その際に、化学研磨・超音波洗浄を施した清浄な Nb 製キャップでフランジ部を覆われ、さらに Nb フォイルにてカバーされる。その様子を図 III-4-3 の右図に示す。これは、真空炉のヒーターなどの高温部についた異物が、空洞内部に飛び込んで来て蒸着することへの防御である。実際にフェルミ研究所では、この Nb 製キャップとフォイルの無い状態で熱処理を行うと、空洞性能が劣化することを確認している [III-4-2]。

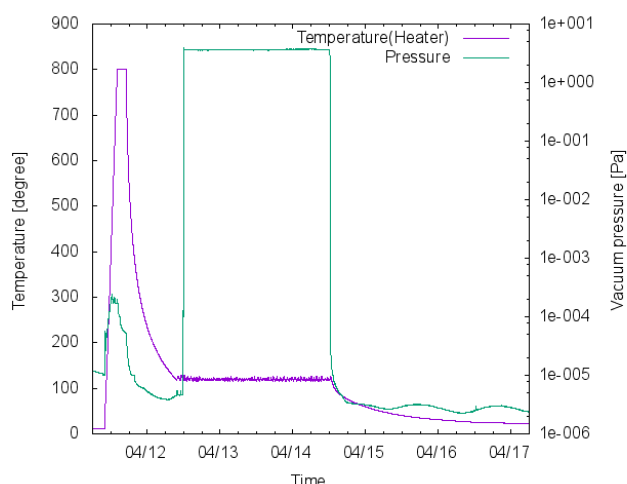


図 III-4-4 N-Infusion 中の温度と圧力の履歴の一例

真空炉での熱処理の様子を図 III-4-4 に示す。これは、後述する KEK / J-PARC での N-Infusion の処理の際のログである。まず、 $200^{\circ}\text{C}/\text{hour}$ 程度の上昇スピードで温度を上げ、 800°C まで到達させる。

では3時間保持する。その後、120℃までは自然冷却にて温度を下げ、120℃で48時間保持する。その際に図からも分かるように3.3 Pa程度の窒素を真空炉に導入する。これにより空洞表面に微量の窒素を拡散させる。

なお、この窒素導入時の圧力では、クライオポンプ等のメインの排気系には負荷が高すぎるため、粗排気システムなどを使って真空を引いておくのが一般的なやり方である。

真空炉から取り出された空洞は、真空炉のクリーンブース内で再びパッキングされ、超純水高圧洗浄の施設まで移動する。超純水高圧洗浄を行った後は、クリーンルーム内にて乾燥させ、縦測定用のフランジ取付を行うなどのクリーンルームアセンブリの作業が行われる。

(4) N-Infusion の理論的背景

N-Infusion を行った Nb サンプルのフェルミ研究所における二次イオン質量分析法(SIMS: Secondary Ion Mass Spectrometry)での表面分析の結果を図 III-4-5 に示す。ニオブ表面の10 nm 程度のごく浅い所に窒素が入り込んでいるのがわかる。

図 III-4-6 には、異なる熱処理を施した場合の空洞性能の比較を示す。図中の緑点で示す電解研磨後に120℃ベーキングを行わない場合だと、25 MV/m を超えたあたりから Q 値が急激に低下する。青点のように電解研磨後に120℃ベーキングを加えると、25 MV/m 付近からの Q 値の劣化が回復する。これが ILC 標準の表面処理レシピの典型的な結果である。さらに赤点のように N-Infusion を施すと、Q 値・加速勾配ともに改善を示す。

理論的には、より高い加速勾配までより高い Q 値を維持できると考えられるが、実際にはニオブ表面の特性による何らかの悪い影響により、高加速勾配における性能が制限されていると理解されている。120℃ベーキングには、電解研磨のみの場合の Q 値の急速な劣化の原因となっている“何らかの悪い影響”を取り除く効果があり、高加速勾配まで比較的高い Q 値が出せる要因となっている。また、N-Infusion はアプローチの方法は別であるが、やはりこの“何らかの悪い影響”を取り除く効果があり、さらには120℃ベーキングの時以上に(高周波的に)より良い表面状態を作り出していると考えられる。

窒素がどのように作用しているのかなどについては、まだ理解されておらず、世界中の研究者によってまさにその謎が探られているところである。N-Infusion による性能が理論限界とは考えられていないので、理論的な理解と実験的な検証が進んで行けば、より高い加速勾配と Q 値を実現できる処理方法も見つけられると考えられる。

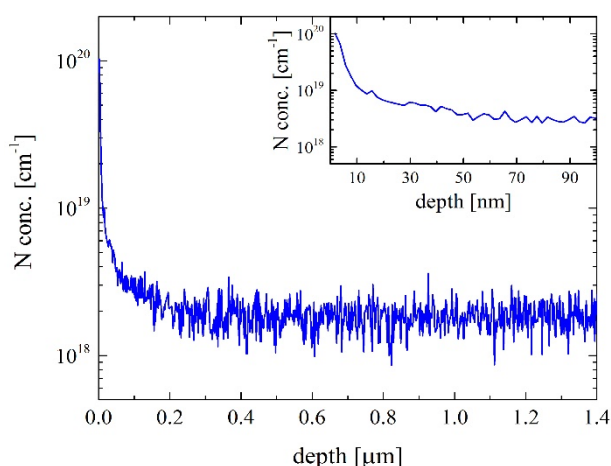


図 III-4-5 N-Infusion を行った Nb サンプルの SIMS での測定結果 (出典：文献 III-4-3)

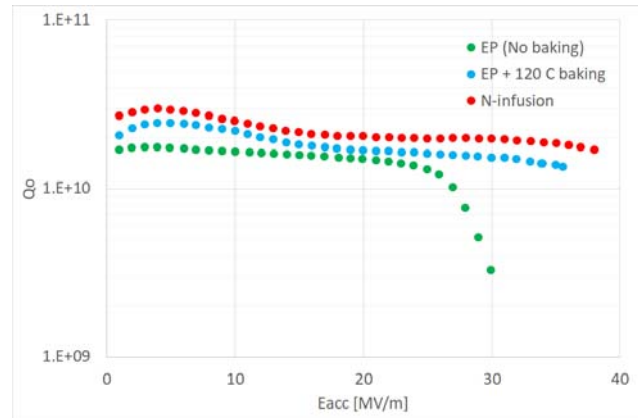


図 III-4-6 それぞれの処理工程での空洞性能の違い。緑：800℃，3時間熱処理＋電解研磨（120℃ベーキング無し）、青：800℃，3時間熱処理＋電解研磨＋120℃，48時間ベーキング、赤：800℃，3時間熱処理＋電解研磨＋N-Infusion（800℃，3時間熱処理＋120℃，48時間，3.3 Pa 窒素導入）

2) N-Infusion の世界的な動向・最新の状況

フェルミ研究所・ジェファークソン研究所・DESY・KEK において、N-Infusion の研究開発が進められている。ここでは、各研究所で得られている結果についてまとめておく。

（1）フェルミ研究所での結果

N-Infusion の研究は、米国・フェルミ研究所が最も進んでいる。単セル空洞に関しては図 III-4-1 に示した通り、45 MV/m 近くの加速勾配が得られており、35 MV/m での Q 値も 2×10^{10} という高い値が得られている。

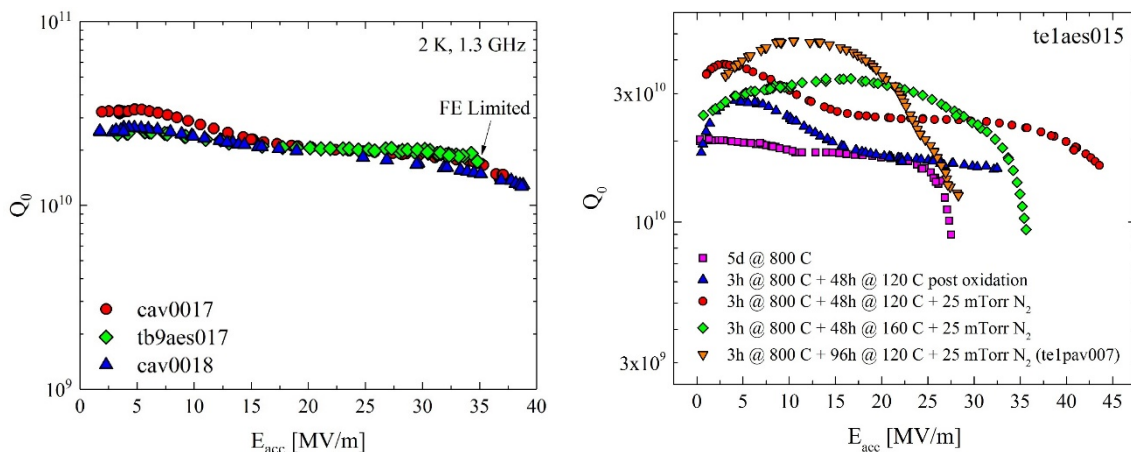


図 III-4-7 (左図) N-Infusion を行った 9 セル空洞の測定結果。(右図) N-Infusion において窒素導入時の温度や時間を変えた場合の単セル空洞に対する測定結果。(出典：文献 III-4-4)

9 セル空洞に対しても N-Infusion を行った結果が公開されており、図 III-4-7 の左図に示すような結果が得られている。加速勾配は 40 MV/m に届いていないので、ILC の標準処理と比較してゲインがあっ

たのかどうかは、この図だけからは定かでないが、35～40 MV/m という比較的高い加速勾配で高い Q 値が実現できているのは、特筆すべきことである。

フェルミ研究所では、窒素を導入する温度や時間を変えての研究開発も様々行っている。図 III-4-7 の右図に単セル空洞に対する実験の結果を示す。各種パラメータに非常に敏感に空洞性能が変化していることが見て取れる。このことは、パラメータの最適化の余地がまだ残されていることを示している反面、多少のパラメータの変化により高加速勾配領域の Q 値劣化や到達加速勾配自体の低下が起こり得る、ということも示しているので注意が必要である。

真空炉の温度と空洞本体の温度の差異、圧力を測定している圧力計の位置、またそれらの真空炉の中での均一性などが空洞性能に影響を与えうる。量産化の際に安定に再現性良く高性能を導き出すためには、これらのシステムの評価なども含めて検証しながら進めて行く必要がある。

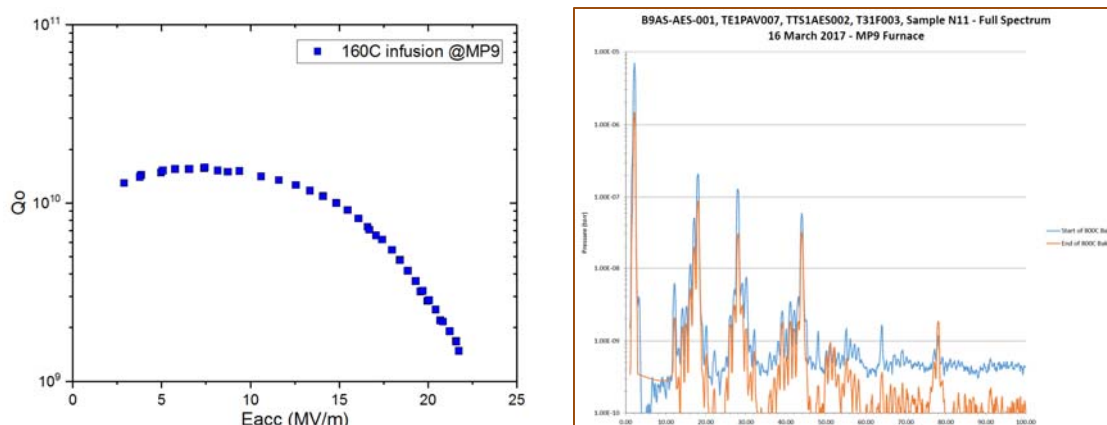


図 III-4-8 (左図) MP9 という建物にある真空炉で N-Infusion を試みた際の測定結果。(右図) この真空炉での熱処理中の残留ガスのスペクトラム。青が 800℃到達直後、赤が 800℃終了時のスペクトラム。(出典：文献 III-4-4)

フェルミ研究所には、二つの真空炉がある。これまで N-Infusion の成功例を紹介してきたが、MP9 という建物の中にあるもう一つの真空炉で N-Infusion を行った場合の例を図 III-4-8 の左図に示す。この真空炉は、もう一つの真空炉よりひと回り大きい、やはりクライオポンプで真空排気されて超高真空まで到達できる仕様になっている。図 III-4-8 は 160℃での窒素導入の場合であるが、10 MV/m 以上で Q 値の劣化が見えている。この真空炉で N-Infusion を行った場合は、だいたいこのような Q 値劣化を示すということである。なお、図 III-4-8 の右図に熱処理中の残留ガス成分スペクトルを示す。ハイドロカーボンのスペクトルが多めに見えており、空洞表面の汚染の原因になっているのではないかと考えられている。

(2) ジェファーソン研究所での結果

米国・ジェファーソン研究所においては、1.5 GHz 単セル空洞を用いて N-Infusion の研究開発を進めている。ここでも 800℃、3 時間の熱処理の後に冷却後窒素を導入しているが、120℃で 48 時間保持して 25 mTorr (3.3 Pa) の窒素を導入している。結果は図 III-4-9 の左図に示してあるが、 Q 値はやや高くなっているものの、加速勾配は標準処理の場合と比較して低下している。また、140℃や 160℃で窒素を導入した場合の研究開発も行っている。図 III-4-9 の右図には、140℃で窒素を導入した際の結果が示されて

いる。フェルミ研究所の結果も同様であったが、高めの温度で窒素を導入すると Q 値が高めに出る傾向がジェファークソン研究所の結果でも得られている。なお、図 III-4-9 中の“Baseline+120 C/48hrs”が、ILC における標準処理レシピに対応するものである、“Baseline”としているものは、電界処理後の 120°C ベーキングを行っていない結果であり、高加速勾配での Q 値劣化を起こしているのでは、その点は注意されたい。

ジェファークソン研究所では、標準処理レシピより高めの Q 値が得られるという、N-Infusion の特徴の一面は見られているが、加速勾配が標準レシピを超えるという結果はまだ得られていない。

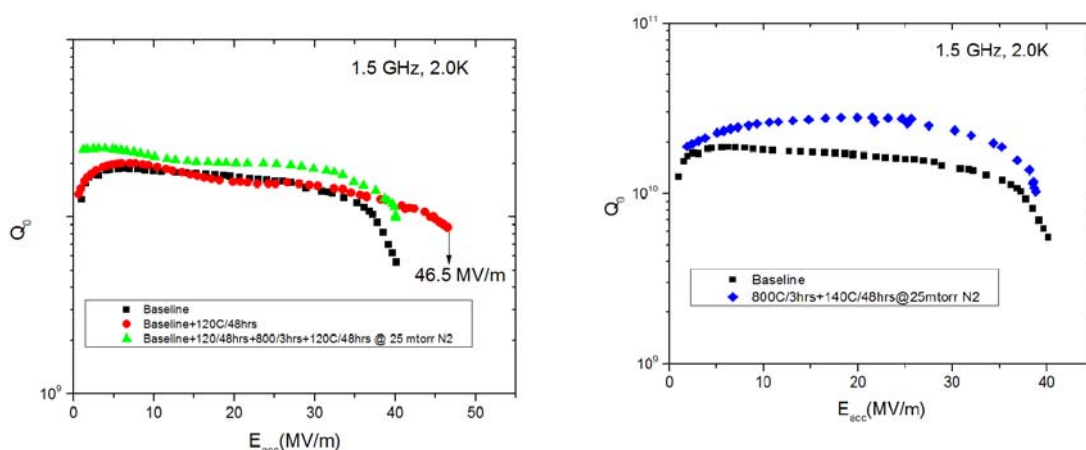


図 III-4-9 1.5 GHz 単セル空洞に対する（左図）120°C N-Infusion, （右図）140°C N-Infusion の測定結果。図中の“Baseline”は電界処理後の 120°C ベーキング無しの場合。いわゆる ILC の標準レシピは、図中の“Baseline+120 C/48hrs”にあたるので注意。（出典：文献 III-4-5）

（3）DESY での結果

ドイツ・DESY においては、ターボ分子ポンプがメインの排気システムの加熱真空炉を用いて N-Infusion の研究開発を進めている。DESY の真空排気系はオイルフリーのシステムであるが、クライオポンプは装備されていない。

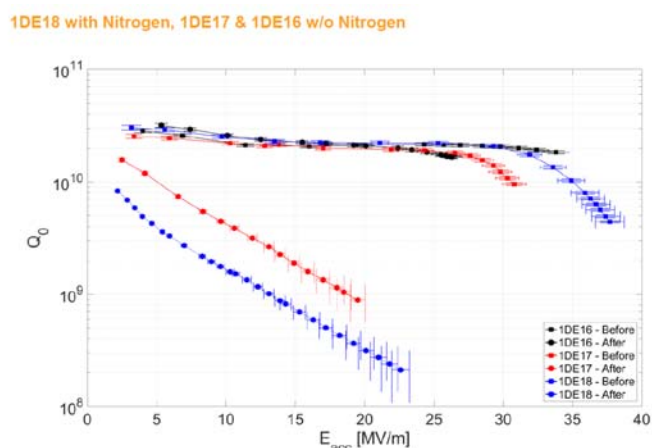


図 III-4-10 DESY 研究所での単セル空洞に対する N-Infusion の測定結果（出典：文献 III-4-6）

DESY で行った三つの単セル空洞への実験の結果を図 III-4-10 に示す。DESY でも 800℃3 時間の熱処理を行った後に、冷却後 120℃で 48 時間保持している。最初の実験（図中の 1DE18 空洞）では 120℃保持の間に窒素を導入している。結果としては、著しい Q 値の劣化が観測されている。窒素とは関係無く、真空炉自体の清浄度が劣化の原因と考えられたので、その後の 2 空洞は、窒素無しでの 800℃、3 時間+120℃、48 時間の熱処理が行われた。最後の実験(1DE16 空洞)では、劣化具合はだいぶ改善されたようであるが、それでも通常処理レシピの性能を下回ってしまっている状態である。

フェルミ研究所の例、DESY の例、この後に述べる KEK/J-PARC の例から分かるように、N-Infusion は真空炉の清浄度に大きく依存しており、清浄な真空炉を維持することが非常に重要である。

（４）KEK / J-PARC での結果

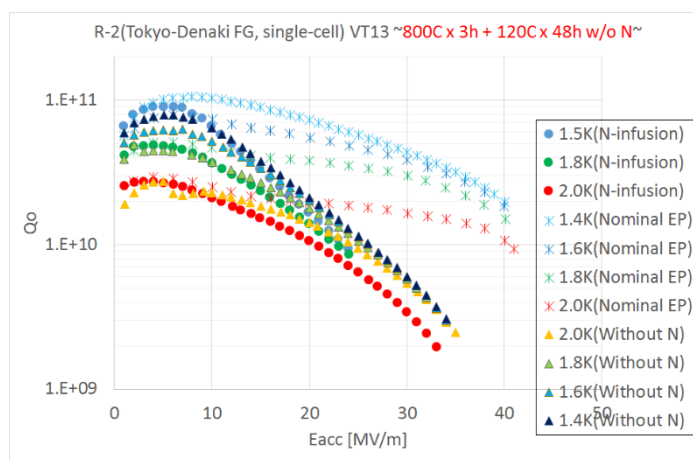


図 III-4-11 J-PARC 真空炉を用いた単セル空洞に対する N-Infusion 試験の結果。標準処理の場合、N-Infusion(窒素有リ)、N-Infusion(窒素無し)の 3 通りの結果を示す。（出典：文献 III-4-7）

KEKには二つの加熱真空炉があるが、どちらも油拡散ポンプがメインの排気系からなる真空炉である。油拡散ポンプではN-Infusionは成功しない可能性が高いので、KEKのN-Infusionの研究開発はJ-PARCの真空炉を用いて行われている。

J-PARCの真空炉は、J-PARC用ビームダクトやフランジなどのコンポーネントの焼き出しに用いられている真空炉で、超伝導加速空洞専用のものではないが、クライオポンプとターボ分子ポンプからなるオイルフリーの真空排気システムにて真空引きされ、 1×10^{-6} Pa 程度の高真空まで到達することができる真空炉である。

この真空炉を用いて、800℃、3 時間+120℃、48 時間（窒素導入有りと窒素導入無し）の N-Infusion の試験を行っている。この結果は図 III-4-11 に示されているが、窒素導入有りの場合も無しの場合も 5 MV/m 付近から Q 値劣化が見られ、標準処理レシピと比較して大幅な性能劣化が観測された。

フェルミ研究所や DESY での結果で見られたのと同様、加熱真空炉の清浄度が十分でなく、空洞性能に悪影響を与えているものと考えられる。

120℃で 3.3 Pa の窒素を保持する際には、クライオポンプはゲートバルブを閉めて真空炉から切り離し、ターボ分子ポンプを停止させて、処理を行っている。その間、簡易粗排気システムにて真空排気を行っているが、このシステムではバックグラウンドの到達真空圧力が 1×10^{-2} Pa 程度である。

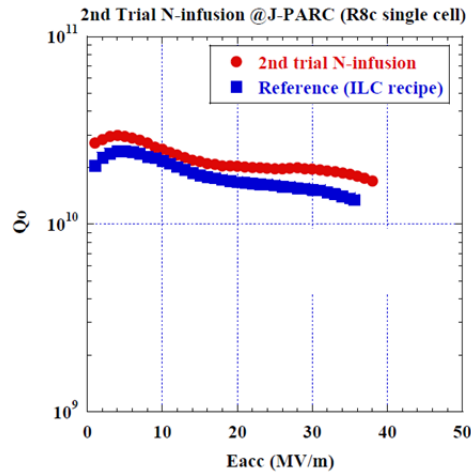


図 III-4-12 真空排気系を改善しての J-PARC 真空炉を用いた単セル空洞の N-Infusion の試験結果（出典：文献 III-4-8）

その後 KEK では、J-PARC 真空炉を用いて別の N-Infusion の試験を行っている。その際は、簡易粗排気システムの代わりに、回転数を落とした状態でのターボ分子ポンプを用いて、室素導入時のバックグラウンドの到達レベルを 1×10^{-5} Pa 程度と 3 桁近く改善して試験を行った。

性能試験の結果を図 III-4-12 に示す。同じ単セル空洞(R-8c 空洞)に対しての標準処理レシピの結果が青で、N-Infusion の結果が赤で示されている。加速勾配は、標準処理レシピでの 36 MV/m から 38 MV/m へ 5.5% の向上を示した。Q 値は全ての加速勾配領域で標準処理レシピを上回っており、35 MV/m で 1.8×10^{10} という高い値が得られた。加速勾配・Q 値ともに性能向上が確認されており、米国以外で最初の N-Infusion 成功例となった。

これまで示してきた各研究所での N-Infusion の結果より、空洞性能は加熱真空炉の清浄度に依存する。汚染の無い加熱真空炉での熱処理が理想ではあるが、繰り返し高温熱処理を行う真空炉では、程度の差こそあれ汚染は避けられないと思われる。図 III-4-11 の結果と図 III-4-12 の結果の比較から、加熱真空炉に多少の汚染がある場合においても、室素導入時における真空排気能力を向上させて、バックグラウンドの真空到達レベルを抑えるとともに空洞への汚染による影響度合いを下げることは、N-Infusion における Q 値劣化を抑制する効果的な手段であると考えられる。

（５）高加速勾配・高 Q 値を実現するための条件

N-Infusion では、高加速勾配のみならず、高 Q 値が期待される。高 Q 値をクライオモジュールで実現するにあたっては、いくつか条件があげられる。

最近の研究から、高 Q 値を得るためには、超伝導加速空洞冷却時に常伝導から超伝導に転移する際の周辺磁場の捕捉を最小限にすることが重要であるということが分かってきている [III-4-9]。そのために行うべきことは、周辺磁場の最小化と冷却時の磁束排除の最適化である。

周辺磁場の最小化は、磁気シールドによる磁場遮蔽を強化することで実現できる。LCLS-II では 2 重の磁気シールドを用いている。また、空洞周辺に磁化した物体（磁化する可能性のある物質）を配置しないということも重要である。

冷却時の磁束排除を効率よく行う手法もいくつかわかってきている。一つは高温での熱処理を行うことで、900℃や 950℃といった熱処理を行うと、大概の空洞用ニオブにおいては磁束排除の効率が劇的に

改善する。また、冷却時に空洞表面にできるだけ大きな温度勾配をつくることで磁束排除に効果的である。この高温熱処理と冷却時の温度差の両方を行うことで効率良く磁束を排除し、高 Q 値を得ることができる。ILC のクライオモジュールならびにヘリウム冷凍機の場合に、どのようなシステムでどのような冷却方法を取れば効率よく磁束排除できるかは、要検討課題である。

N-Infusion をした空洞は、磁場を捕捉してもあまり Q 値の低下に寄与しないとも言われているが^{III-4}、今後系統的データを取得し、クライオモジュールの中でどの程度の磁場遮蔽・磁束排除を行えば良いかを検討し、クライオモジュールならびにヘリウム冷凍機システムに反映していくことが重要である。

高加速勾配を得るためには、欠陥の無い超伝導加速空洞の製造が重要である。空洞製造会社との情報交換を密にし、少しでも空洞性能が向上していくよう努力を積み重ねていくことが必要である。

LCLS-II においては、 $100\ \mu\text{m}$ のバルク電解研磨では十分な性能が出せず、 $200\ \mu\text{m}$ の研磨に変更したという経緯もある。電解研磨の量を多めにするということも性能向上に寄与する可能性がある。

最後に、ひとたび電界放出 (Field emission) を起こすと、加速勾配・ Q 値ともに劣化してしまう。空洞の組立てにおいては、電界放出を起こさない組立て技術確立することが、N-Infusion の空洞のパフォーマンスを最大限発揮するうえでも重要となる。

3) コスト削減の評価

N-Infusion による加速勾配の向上、 Q 値の向上から見込まれるコスト削減に繋がる項目は以下の通りである。

- ① 加速勾配の向上に伴う、加速空洞、クライオモジュール、入力カプラ、周波数チューナーなどのコンポーネントの数量の削減
- ② ヘリウム冷凍機の冷凍能力の削減
- ③ 仕上げ電解研磨処理工程が無くなるための工程の簡略化

ここでは、加速勾配の向上を $Y\%$ 、 Q 値の向上から得られる空洞の壁損失によるヘリウム負荷の削減量を $Z\%$ として以下の議論を行う。

また、ILC 全体の予算のうち、空洞・クライオモジュールが占める割合が 35% 、ヘリウム冷凍機の占める割合が 8% として、以下の見積りを行う。

(1) 加速空洞、クライオモジュール等の数量の削減効果

加速勾配が $Y\%$ 向上すると、必要な空洞・クライオモジュール等の数は $Y\%$ 削減できる。 $(35 \times Y / 100) = (0.35 \times Y)\%$ の削減効果となる。

加速勾配が 1% 向上するごとに 0.35% のコスト削減となる。仮にフェルミ研究所で単セル空洞に対して得られているように 10% の加速勾配の向上が得られれば、ILC 全体では約 3.5% のコスト削減効果となる。

(2) ヘリウム冷凍機の冷凍能力の削減

ヘリウム冷凍機の負荷は、静的熱負荷 (static heat load) と動的熱負荷 (dynamic heat load) とに分けられる。静的熱負荷は常温部から低温部への熱侵入であり常時熱負荷となっているものである。それに対

して大電力高周波を印加した時の熱負荷が動的熱負荷である。空洞表面での損失は動的熱負荷に入る。

まず①の加速勾配の効果であるが、加速勾配と反比例して空洞・モジュール台数が減少する。全体での静的熱負荷は空洞・モジュール台数に比例するので、加速勾配に反比例して小さくなる。一方で、空洞一台あたりの壁損失は加速勾配の 2 乗に比例して増加する。空洞台数が減少した効果と合わせると、ILC 全体での空洞の壁損失は、加速勾配に比例して大きくなる。

N-Infusion により空洞の Q 値を向上させることができると、動的熱負荷の空洞の壁損失分を低減することができる。以下は簡略化のために、全ての動的熱負荷は空洞の壁損失からくるものと近似して議論を行う（入力カプラ等の動的熱負荷は省いている）。

もともとの静的熱負荷の大きさを SL、動的熱負荷の大きさを DL とすると、N-Infusion を施して、Y%の加速勾配の向上と、Z%の空洞の壁損失の低減が実現できたとすると、全てのヘリウム熱負荷は以下のように表される。

$$\{ST \times (100-Y)/100\} + \{DL \times (100+Y)/100 \times (100-Z)/100\}$$

仮に静的熱負荷：動的熱負荷が 1:1 であると仮定して、加速勾配が 10 %向上、動的熱負荷が 50 %削減できたとすると、全体でのヘリウム熱負荷は 25%削減できることになる。一般に冷凍機のコストは容量の 0.6 乗に比例するとされ、この場合は、 $0.75^{0.6} \sim 84\%$ となり 16%の削減に相当する。ILC 全体に占める冷凍機のコストが 8 %だとすると、ILC 全体で見て 1.3%のコスト削減に相当する。この 1:1 の比率の場合は、加速勾配の向上による空洞台数削減の効果は、静的熱負荷の低減と動的熱負荷の増加でキャンセルされる。実質的に Q 値の向上による動的熱負荷の低減のみがヘリウム冷凍機熱負荷の低減に寄与する。

（３）仕上げ電解研磨処理工程が無くなるための工程の簡略化

仕上げ電解研磨処理工程が空洞・クライオモジュールのコストに占める割合は 2 %程度と推測される。空洞数量の削減効果は①に含まれているので、それ以外の削減効果を見積もると

$$((35 \times (100 - Y) / 100) \times 0.02) \% \text{の削減効果となる。}$$

10%の加速勾配の向上が得られた場合で 0.62%、加速勾配に変化がなかった場合で 0.69%の削減効果と見積もられる。空洞削減台数があまり多くない限りは、仕上げ電解研磨工程を省くことで約 0.7%のコスト削減に繋がる。

N-Infusion の場合も ILC 標準処理レシピの場合も、仕上げ電解研磨を省くことは可能であるが、空洞性能劣化のリスクもはらむ選択肢であり、再処理によってかえってコストがかさむ可能性も十分考えられる。達成できている技術レベルで、要求される空洞仕様性能に対して、どれだけの歩留まりが期待できるのかは、慎重に判断したうえで最終処理方法を選択することが必要である。

（４）コスト削減の見積り

以上の議論をまとめると

- ① 加速勾配の向上に伴う、加速空洞・クライオモジュールの削減による効果
10%の加速勾配の向上が得られると、ILC 全体に対して 3.5%のコスト削減。1%の加速勾配の向上ごとに約 0.35%のコスト削減となる。
- ② ヘリウム冷凍機の冷凍能力の削減
静的熱負荷と動的熱負荷の比がそれほど変わらなければ、加速勾配には依存しない。静的熱負荷と動的熱負荷の比が 1:1 である場合に動的熱負荷を半減することができる、トータルのヘリウム熱負荷は 25%削減される。仮にヘリウム冷凍機の ILC 全体に占める割合を 8%とすると、ILC 全体で見た時に、1.3%のコスト削減になる。

③ 仕上げ電解研磨処理工程が無くなるための工程の簡略化

0～10 %程度の空洞台数削減を考える限りは、ILC 全体に対して約 0.7%のコスト削減となる。

以上を足し上げると、加速勾配で 10%の向上、動的熱負荷で 50%の削減ができたとすると、最大で 5.5%程度のコスト削減となる。研究開発の成果を 50～100%とすると、2.7%～5.5%のコスト削減が期待できる。ただし、静的熱負荷と動的熱負荷の比については検証が必要である。

(5) その他

N-Infusion を行う、もしくはクライオモジュールでも高 Q 値を維持するためには、TDR で想定しているものよりもコストがかかる可能性のある工程も出てくる。以下に記す。

- ・ クライオモジュールの磁気シールドの強化
- ・ クライオモジュール内から磁化する材料を排除するための材料選択
- ・ 冷却時に温度勾配をつけるための冷凍機の制御システム（何空洞単位で冷却するのかわかれば余分なバルブ等も必要になる可能性がある）
- ・ 仕上げ電解研磨が無くなった分の、バルク電解研磨の長時間化（もしくは、空洞性能向上のために多量の電解研磨が必要になる可能性）
- ・ 真空熱処理の長時間化による必要な加熱真空炉の台数（空洞 1 台あたり通常処理の 2 倍近い時間が必要）
- ・ 熱処理時の Nb 製キャップ等の化学研磨と洗浄処理
- ・ 熱処理前の空洞の超音波洗浄および超純水高圧洗浄
- ・ 磁束排除のための 900℃もしくは 950℃熱処理。これに関連して機械的強度が低下する場合には空洞設計を変更する必要性が生じる可能性あり。

今回のコスト削減の評価に、これらのコスト増加に繋がる工程は含まれておらず引き続き研究開発の過程で明らかにする必要がある。

また、以上の議論は、加速勾配で 10 %、空洞の Q 値に 2 倍の改善が得られたとした場合である。これらの値が得られるかどうかは、今後の研究開発の様子をしっかりと見守り判断する必要がある。特に N-Infusion は、加速勾配、Q 値ともに劣化させるリスクもあるので、リスク評価もしっかり行うことが必要である。

必ずしも N-Infusion を用いなくとも加速勾配や空洞 Q 値を向上させる可能性はある。加速勾配に関しては、組み立て工程を徹底的に改善して電界放出を極力抑えることである。逆に、電界放出を抑えられないと、せっかく N-Infusion が成功しても空洞性能が劣化してしまう。N-Infusion への取り組み以上に、空洞組立、モジュールのストリングアセンブリの技術確立にも努力をするべきである。

Q 値に関しては、LCLS-II などでの研究成果から、TDR の当時とは大分状況が変わってきている。N-Infusion を行うメリットはもちろんあるが、N-Infusion を行わずとも電界放出さえ抑制して、周辺磁場の制御および効率的な磁束排除が正しく行えれば TDR での $Q_0 \geq 1 \times 10^{10}$ より高い Q 値を得られる可能性は高い。ILC 標準処理のレシピの場合にどれくらいの Q 値を目指せるのかは検討しておく余地があるだろう。

上記の議論からも明らかなように、ヘリウム熱負荷低減の効果も加速勾配向上と同程度に ILC 全体のコスト削減に寄与する。特にヘリウム熱負荷の削減は建設コストのみならず運転コストの削減にも絡んでくるので重要な課題である。静的熱負荷の精確な見積りと合わせて、低ヘリウム熱負荷のクライオモジュールデザインを真剣に検討すべきである。

4) 研究開発に必要な期間および費用

N-Infusionに限らず超伝導加速空洞関連の開発は、単セル空洞 ⇒ 9セル空洞 ⇒ 横型クライオスタット試験 ⇒ クライオモジュール試験、と進んでゆくのが一般的である。N-Infusion の場合も、この流れで研究開発が進められていくことになる。

現在のところ、各研究所では単セル空洞を中心に開発を進めている。フェルミ研究所ではうまく行っているが、その他の研究所では、最近の KEK / J-PARC の 1 例のみが成功例である。

まずは、真空炉の清浄化、窒素パラメータの最適化なども含め、単セルでの成功事例を増やしていくことが当面の各研究所の目標となろう。幸い KEK では、今春新しい真空炉を導入予定であるので、良い結果が出てくることが期待される。

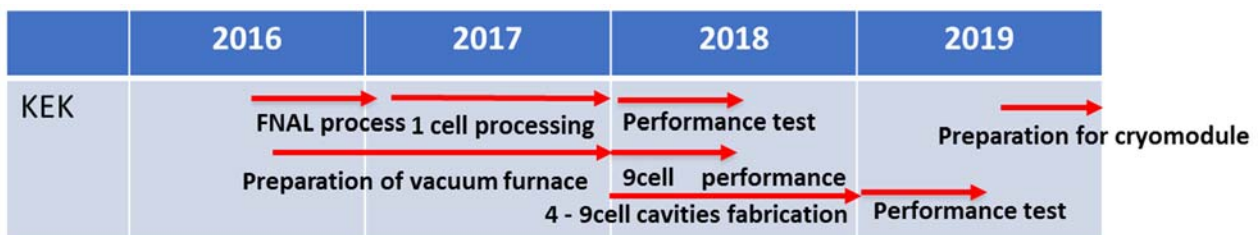


図 III-4-13 KEK における工程表

N-Infusion の開発には、9 セル空洞に対して縦測定での性能評価を行い、N-Infusion が有効であるかを判断するのに 2 年程度が必要である。図 III-4-13 に参考のため KEK における N-Infusion 研究開発の工程表を示す。

海外の研究所との間の協力関係のもと、研究成果の情報交換のみならず、研究所間での空洞交換なども行いながら機動的・効率的に研究が進められている。2018 年度は引き続き単セル空洞を用いて真空炉条件や窒素パラメータの最適化を探る研究が続けられる一方で、何台かの 9 セル空洞への N-Infusion 試験も行われる予定である。2019 年度は、4 台の 9 セル空洞に対する N-Infusion の縦測定や横測定などの評価がなされる。これらの研究開発を進めるには、3 年間で 7.7 億円程度の予算が必要である。

N-Infusion で性能向上が確認された空洞に対しては、クライオモジュール内でも性能を保持できるかどうか重要である。そのために横型クライオスタットのような試験システムや、実際のクライオモジュールに組んで試験を行うが、試験結果が出るところまでを考えると、さらに 1 年（～2 年）必要になる。

実際に KEK でも、N-Infusion を行った空洞にヘリウムジャケットを取り付けて、2019 年度後半に横型クライオスタットやクライオモジュールにインストールすることが検討されている。試験結果が出るのは 2020 年以降となろう。海外の研究所とも協力して、効率よく試験を進めることが望まれる。

参考文献

- [III-4-1] A. Grassellino, et al., “Unprecedented Quality Factors at Accelerating Gradient up to 45 MV/m in Niobium Superconducting Resonators via Low Temperature Nitrogen Infusion”, Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 094004 (10pp)
- [III-4-2] A. Grassellino, et al., “Fermilab experience of post-annealing losses in SRF niobium cavities due to furnace contamination and the ways to its mitigation: a path to processing

- simplification and quality factor improvement”, arXiv:1305.2182 (2013)
- [III-4-3] S. Aderhold / A. Grassellino, “New low T nitrogen treatments cavity results with record gradients and Q”, TTC@Saclay (2016)
- [III-4-4] M. Martinello, “High-Q at high gradient at FNAL”, LCWS2017 (2017)
- [III-4-5] P. Dhakal, “High Q via N infusion 研究開発 at Jefferson Lab”, LCWS2017 (2017)
- [III-4-6] M. Wenskat, et al., “N infusion study at DESY”, LCWS2017 (2017)
- [III-4-7] K. Umemori, “N-doping / infusion study in KEK / J-PARC”, LCWS2017 (2017)
- [III-4-8] K. Umemori et. al., "N-infusion at KEK/J-PARC", TTC meeting at INFN, Milano (2018), <https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=13791>
- [III-4-9] S.Posen, et al., “Efficient expulsion of magnetic flux in superconducting radio frequency cavities for high Qo applications”, Journal of applied physics 119, 213903 (2016)

5. N-Infusion 活用のための高周波系の研究開発（高電界運転に向けて）

1) 大電力高周波源の研究開発の概要

N-Infusion が成功した場合、平均加速電界 35 MV/m の空洞を運転することになる。高周波系としては、TDR のパワー分配系の構成を引き続き採用しつつ、平均加速電場 35 MV/m、39 台の超伝導加速空洞に対応する高周波源を構築するのが合理的な方法と考えられる。この場合、低電力制御系も TDR と同様の構成で運用することが可能であり、大電力高周波源（HLRF: High Level Radio Frequency）の研究開発項目は、クライストロンと変調器になる。

35 MV/m でビーム加速するために要求される最小高周波電力は、TDR での 31.5 MV/m 時（空洞への入力電力 $P_g = 189 \text{ kW}$ ）と比較して 10%増加した 210 kW になる。この最小高周波電力でのビーム加速を実現するためには、空洞の負荷 Q 値を TDR の 5.46×10^6 に対して 10%大きい 6.07×10^6 に設定する必要がある（図 III-5-1）。この値は入力カプラの内導体のビームパイプへの挿入長を調整することで実現可能な数値である。

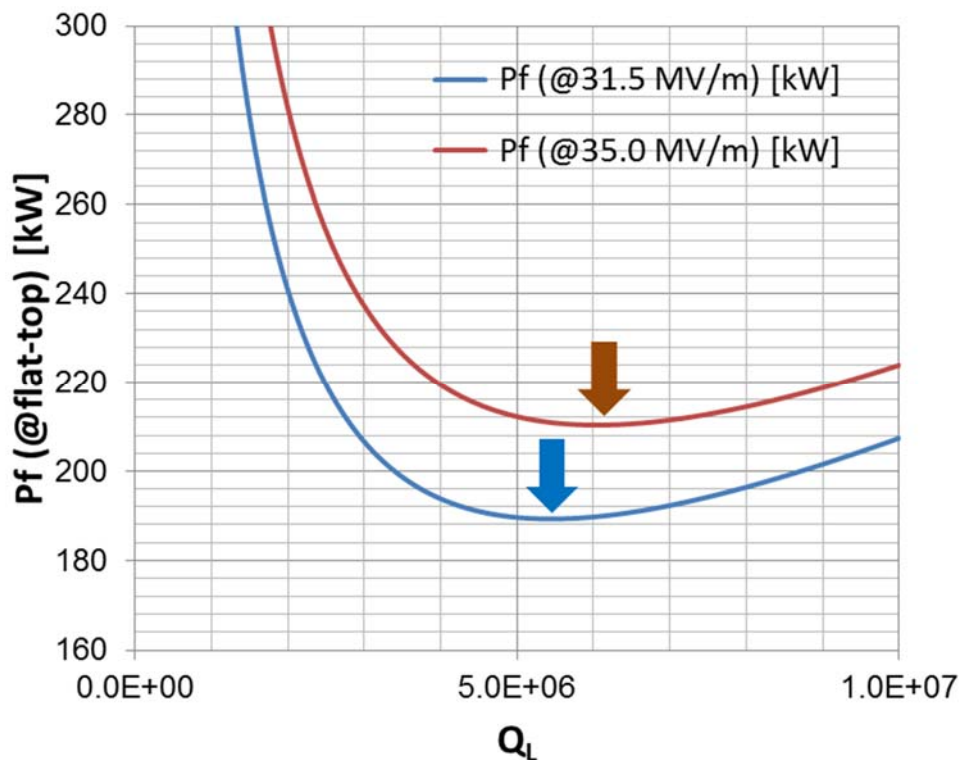


図 III-5-1 ビーム加速時に必要な高周波電力と空洞の負荷 Q 値

最小高周波電力（210 kW）、最適化された空洞の負荷 Q 値（ 6.07×10^6 ）の条件で空洞電場を 35 MV/m まで蓄積するために必要な時間（フィリングタイム）は $1,030 \mu\text{s}$ であった（図 III-5-2）。この値は TDR のフィリングタイム（ $927 \mu\text{s}$ ）と比較して 11%の増加となっている。ビームパルス幅は $727 \mu\text{s}$ に固定であるので、総高周波パルス幅は 1.76 ms となり TDR での値（ 1.65 ms ）と比較して約 7%長くなる。また TDR の場合と同様に最小高周波電力で 39 空洞運転するために必要なクライストロンの高周波出力を評価したところ、11 MW で対応可能であった（表 III-5-1）^[III-5-1]。

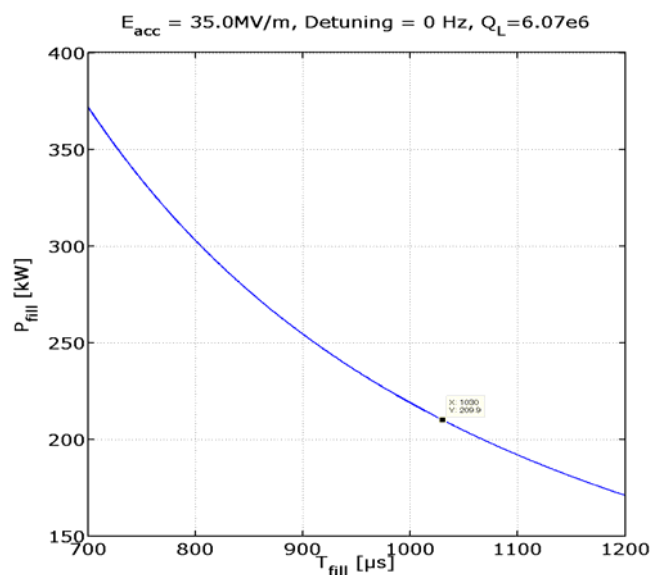


図 III-5-2 高周波電力と 35 MV/m に到達するまでのフィリングタイム

表 III-5-1 35 MV/m 空洞と 31.5 MV/m 空洞運転時の使用高周波電力

		210 kW	189.18 kW
Extra beam power for $\pm 20\%$ gradient spread	5.30%	221.13 kW	199.21 kW
s.s. reflection for $\pm 20\%$ gradient spread	6.00%	234.40 kW	211.16 kW
Required LLRF overhead	7.00%	250.82 kW	225.95 kW
Local PDS average losses	8.00%	272.62 kW	245.59 kW
	39 unit	10632.11 kW	9578.01 kW
Combining/splitting and shielding penetrations	1.10%	10750.55 kW	9684.71 kW
WR770 run loss/3	1.40%	10903.18 kW	9822.21 kW

以上のことから、35 MV/m 運転時の高周波源には、1) クライストロン高周波出力 11 MW 以上、2) 高圧パルス幅 1.76 ms への延長が必要となる。

クライストロンの高周波出力 11 MW 以上、高周波パルス幅 1.76 ms を達成するための手段として、

1. マルクス型電源は、その特性を用いて現状の最大 140 A、120 kV パルス出力の性能を変えず、セル数増加や内部キャパシタ増強により要求される高圧パルス幅に対応
2. 現状の 10 MW マルチビームクライストロン (MBK: Multi-beam klystron) の効率 65% を更に向上した効率 71% (高周波出力 11 MW) 以上の新クライストロンの開発

により要求を満たすことが可能である。高圧パルス幅が増加するが、クライストロンの効率を向上させることで総電力を抑えることが可能となり、全体としてコスト削減に寄与する。これまでのクライストロン開発では、最大出力を目標として行われてきた。しかし、ビームを加速するための高周波源としてのクライストロンの効率を向上させることは、ほかの計画中の大規模加速器 (CLIC や CEPC、FCC) にとって必須であり、CLIC や CEPC では効率 80%^[III-5-2, III-5-3]、FCC では効率 90%^[III-5-4] のクライストロン開発が検討されている。高効率クライストロンの開発は、この傾向に沿うものである。

クライストロンの効率を向上させるには、電子の電荷による反発力を低減させてビーム電流を効率良く集群させることが鍵となる。そのため新クライストロンの開発方針として、クライストロンの全長を長くしてコア振動によるビームバンチング^[III-5-5]や BAC (Bunching-Alignment-Collecting) 法によるビー

ムバンチング^{III-5-6)}、などのいくつかの手段が考えられる。図 III-5-3 は既存のクライストロン (SLAC 5045 クライストロン) に BAC 法を用いた空洞を追加したクライストロンシミュレーションの結果を示す^{III-5-7)}。シミュレーションでは効率がそれまでの 45% から 55% へ改善され、実機での試験の結果でも効率 54% (高周波パルス幅 100 ns での運転) の結果が得られている。

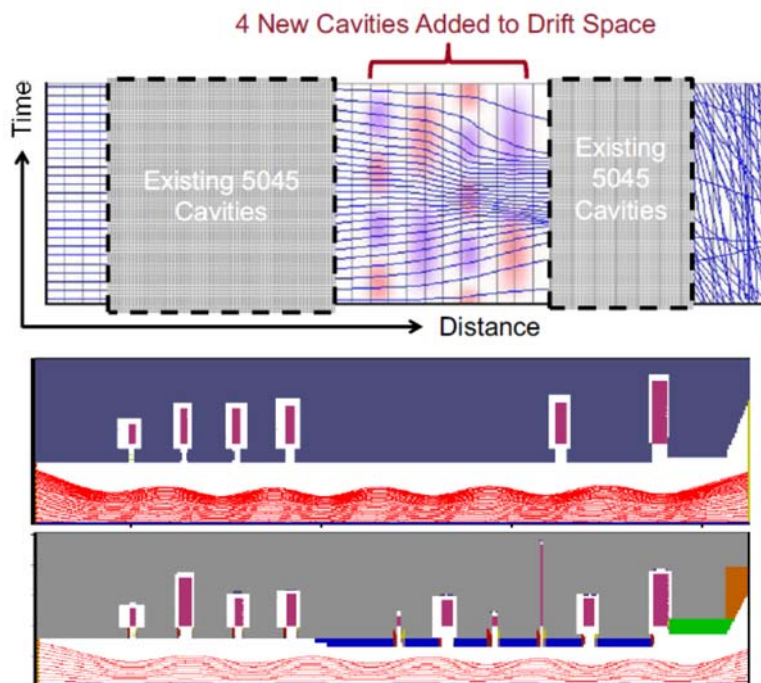


図 III-5-3 BAC 法でのクライストロンシミュレーション

上 : 1D simulation (AJDISK)、下 : 2D simulation (MAGIC2D) (出典 : 文献 III-5-7)

2) コスト削減の評価

11 MW 高周波源モデルの場合、TDR と比較してクライストロンの高周波出力が 10% 増加、マルクス型電源の高圧パルス幅が 7% 増加する。これにより、クライストロンの単体価格は 10% 程度、マルクス型電源の単体価格は 7% 程度の増加と見込まれるが、空洞の加速電場が 10% 向上したことにより、必要となる高周波源のユニット数は 10% 減少する。また TDR のコストモデルでは、クライストロンとマルクス型電源は高周波源の大電力関連のコストの半分程度を占めている (残りはパワー分配系)。

これらにより 11 MW 高周波源のモデルでは、TDR の高周波源と比較してクライストロンとマルクス型電源でコスト増であるが、ユニット数の減少の効果により、大電力高周波関連のコストに対して 5% 程度のコスト削減になる。研究開発による成果を 50~100% とすると、大電力高周波関連のコスト 2.5%~5% のコスト削減が期待できる。

3) 研究開発に必要な期間および費用

最大高周波出力 11 MW 以上、効率 71% 以上のクライストロンと高圧パルス幅 1.76 ms のマルクス型電源の研究開発は以下のように進める。以下に研究開発期間中のスケジュールとコストを示す。

1 年目) クライストロン製造元とクライストロン高効率化に向けた設計方針を決めて、シミュレーションでの動作確認と実機製造のための設計を進める。同時に 11 MW クライストロン運転パラメータ (最大

高圧出力 140 A、120 kV、高圧パルス幅 1.76 ms、繰り返し 5 Hz) に対応可能な改修を施したマルクス型電源の構築、模擬負荷を用いた長時間の動作試験を行う。

2 年目以降) 年 1 本の頻度でクライストロンを製作、最大高周波出力や効率、ゲインの測定や寄生発振の有無を調査する評価試験を実施する。実機の性能がシミュレーションから推定される最大高周波出力や効率と異なり低性能、または寄生発振による高周波出力があった場合にはその原因を調査、以降のクライストロン設計へフィードバックをかける。

研究開発期間として 4 年を想定した場合、3 本のクライストロンを設計、製造、運転試験することになる。これにより最大高周波出力 11 MW 以上、効率 71%以上のクライストロン開発の目途がつくと思われる。

11 MW クライストロン運転用に高圧パルス幅を増強したマルクス型電源 1 台の製造費用として 1 億 2,000 万円と見積もる。この値は KEK で試験中の 10 MW L-band MBK 用マルクス型電源 (最大高圧出力 140 A、120 kV、高圧パルス幅 1.65 ms、繰り返し 5 Hz) を基に算出している。またクライストロン開発関連では、研究開発期間の 2 年目にクライストロン製造費と評価試験のために必要な機器 (負荷やカプラなどの立体回路やパワーメーター等の測定機器) に 9,000 万円、3 年目および 4 年目はクライストロン試作に 8,000 万円と見積もる (総額 3.7 億円)。

参考文献

- [III-5-1] T. Matsumoto, “RF operational issue at 35MV/m operation”, AWLC17.
https://agenda.linearcollider.org/event/7507/contributions/39211/attachments/31812/47977/AWLC2017_matsumoto_v3.pdf
- [III-5-2] O. Z. Xiao et al., “Design Study of RF Section and Cavities for CEPC 650 MHz Klystron”, IPAC2016,MOPMY014.
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/ipac2016/papers/mopmy014.pdf>
- [III-5-3] I. Syratchev, “Roadmap for CLIC high-efficiency klystron development”, CLIC Workshop 2014.
https://indico.cern.ch/event/275412/contributions/1617688/attachments/498826/689102/Road_Map.pdf
- [III-5-4] C. Lingwood, “Development of the high efficiency MBK klystron for FCC”, CLIC Workshop 2016.
https://indico.cern.ch/event/449801/contributions/1945321/attachments/1215049/1773914/CLIC_2016.pdf
- [III-5-5] A. Yu. Baikov, O. A. Grushina and M. N. Strikhanov, “Simulations of conditions for the maximal efficiency of decimetre-wave klystrons”, Technical Physics, vol. 59(3), pp. 421-427, Mar. 2014. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1063784214030037.pdf>
- [III-5-6] I. A. Guzilov, “BAC method of increasing the efficiency in klystrons”, *IEEE Vacuum Electron Sources Conference (IVESC)*, June 20-July 4, 2014.
<http://ieeexplore.ieee.org/document/6891996/>
- [III-5-7] R. Kowalczyk et al., “Test of a BAC Klystron”, SLAC-PUB-17102.
<https://www.slac.stanford.edu/pubs/slacpubs/17000/slac-pub-17102.pdf>

6. 入力カプラ

1) 背景

超伝導加速空洞に大電力高周波を送り込むための同軸型の高周波機器のことをカプラと呼ぶ。ILC で検討されているカプラのデザインには2種類あり、主に欧米で使用されてきた DESY の TTF-3 型 (ILC-TDR 参照) と主にアジアで使用されてきた KEK の STF-2 型である [ILC-TDR および III-6-1]。

高周波窓に使用されているセラミック材料は、各地域で調達されてきたが、日本国内においては主要メーカーが昨年度に撤退してしまい、国内・海外問わず代替会社を新たに探す必要が生じていた。一方、カプラの内表面に施されている銅メッキについては、銅の室温と低温での抵抗率の比 (RRR: Residual Resistivity Ratio) の著しい低下を生ずることが判明し、別の方法を探す必要が生じていた [III-6-2]。

図 III-6-1 は国内のカプラ製造会社が 2013 年に東京大学で開催されたリニアコライダーの国際会議にて示した二つのデザインのコストの内訳である [III-6-3]。これを見ると、材料および加工費、ロウ付け費、銅メッキ費、窒化チタン (TiN) コーティング費の四つが大部分を占めていることが分かる。また、この円グラフを見ても分かるように、カプラの製造工程は空洞と違い多岐にわたっており、このことがカプラのコストが空洞と同程度になっている理由である。

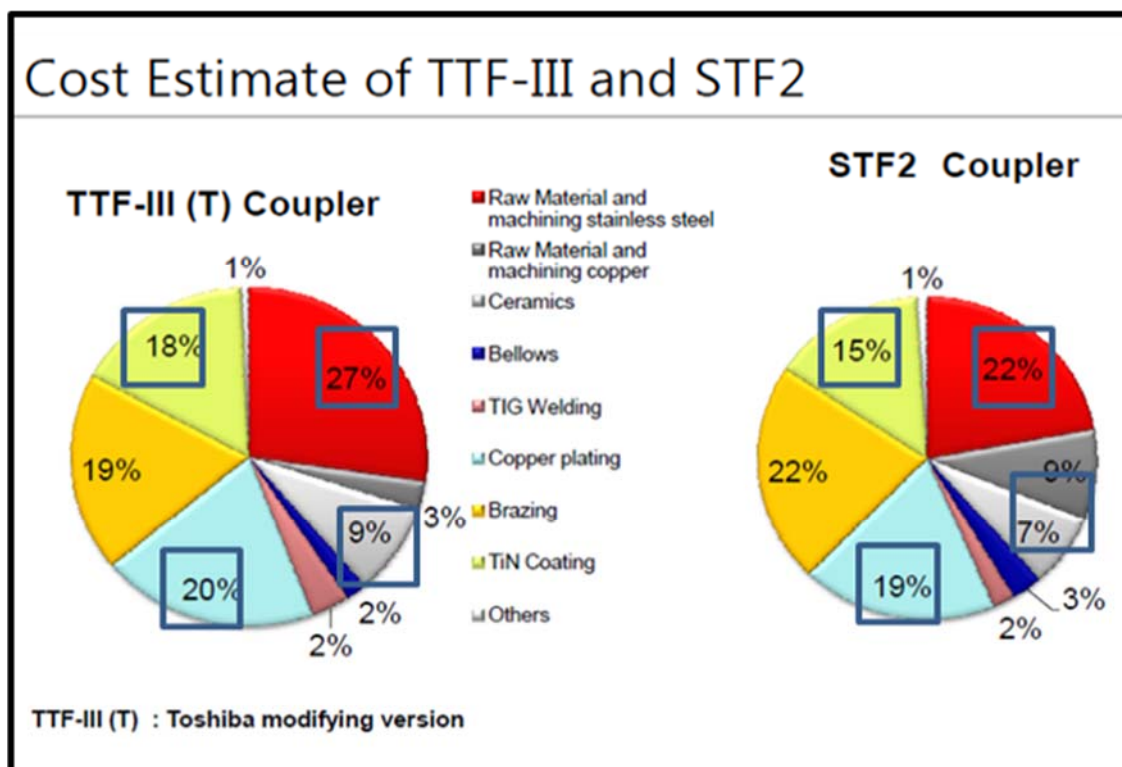


図 III-6-1 二つのデザインにおける各項目のコストの内訳 (出典: 文献 III-6-3)

今年度のカプラのコスト削減に関する調査・研究については、この円グラフの中のセラミック材料、コーティング、銅メッキの三つを重点的に行うことにしている。

2) 開発の現状

これまでのセラミックおよびコーティングに関する調査・研究の現状について以下に説明する。

(1) セラミック材料に関するもの

セラミックの特性については、以下の四つが重要なものである。

- ① 比誘電率(ϵ)
- ② 誘電正接($\tan\delta$)
- ③ 表面抵抗率(ρ)
- ④ 二次電子放出係数(δ_{SEE})

現在、供給可能なセラミック会社としては、国内海外合わせて数社があり、この中から最適なセラミックの特性を調べることが急務である。特性を調べる際に、上記四つの特性の内、①～③は日本工業規格(JIS: Japan Industrial Standard)に則った方法で実施した。各測定に用いるサンプル形状も、それぞれの測定装置に特化したものとなっている。以下、各パラメータ測定について説明する。

i. 比誘電率と誘電正接の測定

比誘電率と誘電正接の測定は、基本的に同じセットアップで測定できる。一般に、誘電率は実部と虚部に分けられ、それらの比を取ったものが誘電正接である。カプラに用いられるセラミックの典型値としては、比誘電率が ~ 9 、誘電正接が 5×10^{-4} 程度である。この測定のために、棒状のサンプル(2社4種類、1サンプル毎に5本ずつ用意)を製作し、空洞共振器法にて測定を実施した(図 III-6-2)。また、その測定結果の一例が表 III-6-1 である。

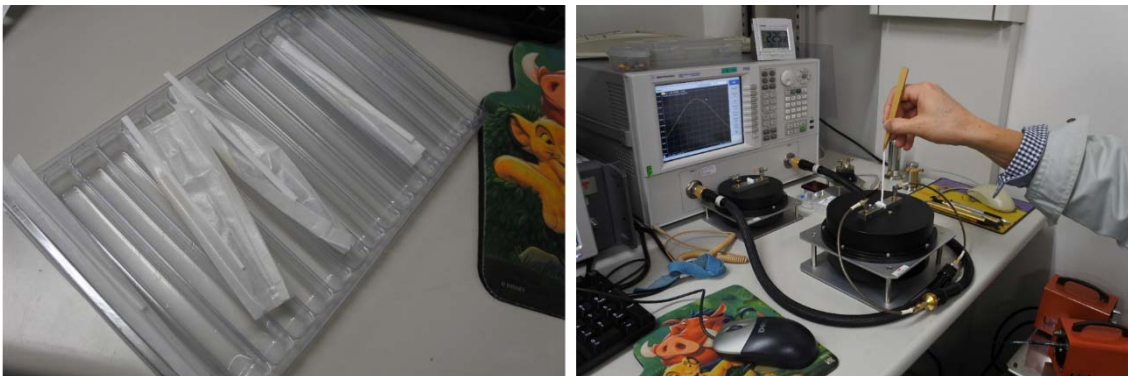


図 III-6-2 棒状セラミックサンプル(左)と比誘電率・誘電正接測定装置(右)

表 III-6-1 セラミックの比誘電率と誘電正接の測定値とスペックの比較の一例

Sample #1	周波数 [MHz]	比誘電率	誘電正接
Spec.	1000	9.00	3.0E-04
Meas.	1000	9.39	1.86E-04
Meas.	2000	9.32	2.68E-04

ii. 表面抵抗の測定

表面抵抗に関しては、ディスク状のサンプルを製作し、絶縁抵抗計にて測定した(図 III-6-3)。典型値としては、表面抵抗率が $10^{15} \Omega/\square$ 、体積抵抗率が $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 程度である。ただし、表面抵抗はTiNコーティングにより変化する可能性があるため、コーティングの有り無しのサンプルで差を比較するこ

とにした。その結果の一例が表 III-6-2 に示されている。結果としては、コーティングの有り無しで明確な違いは認められなかった。



図 III-6-3 円盤状セラミックサンプル（左）と表面抵抗測定装置（右）

表 III-6-2 セラミックサンプルの表面抵抗の比較の一例

Sample #2	TiN コーティング有り	TiN コーティング無し
Meas.	$3.3 \times 10^{15} \Omega/\square$	$1.8 \times 10^{15} \Omega/\square$

iii. 二次電子放出係数の測定

二次電子放出係数は、大電力高周波投入時のマルチパルサ放電の発生を抑制するため極力下げておく必要がある。従来、セラミックに TiN コーティングを施すことで抑制効果が確認されていたが、カブラの準備作業中に行う超音波洗浄やオゾン水洗浄などでも同様に下がることが確認されている。オゾン水洗浄の効果については、参考文献[III-6-4]に測定結果が載っている。カブラ用のセラミックを選択するにあたっては、二次電子放出係数の直接の測定が望ましい。

（２） セラミックに施すコーティングに関するもの

セラミック表面には、従来二次電子放出係数を下げる目的で TiN コーティングが施されていたが、高周波窓の製造コストの半分以上を占める高コスト工程となっていた。TiN コーティングの工程がスキップできれば、大幅なコスト削減につながる可能性があるため、国内メーカーとの協力研究で TiN コーティングを用いないセラミックの開発を行い、2014 年に試験用のカブラを製作した（図 III-6-5 で示したものおよび参考文献[III-6-5]）。セラミックの特性としては、二次電子放出係数がある程度下がったものの（ ~ 3 ）、誘電正接が一桁高くなってしまい（ 3×10^{-3} ）、まだ実用段階には達していないものと思われる。このことは、実際に行った大電力高周波試験においても、RF duty cycle が高いところでは高周波窓部に異常な発熱が観測されたことから理解できる[III-6-6]。しかし、先の超音波洗浄のところで説明したように、二次電子放出係数は超音波洗浄によりある程度低下することが分かっており、この効果によりベンチテストでのスペックパワーとしてはすでにほぼクリアしている。図 III-6-4 は TiN コーティングを施したセラミックと TiN コーティングの無いセラミックの写真である。



図 III-6-4 TiN コーティングを施した従来のセラミック（左）、TiN コーティングの無い新型セラミック（右）

TiN コーティングの方法についても、真空チャンバーの構造や治具を工夫することでコスト削減につながる可能性はあり、二次電子放出係数測定用に今回製作したサンプルにおいては一度に TiN コーティングが行えるような治具の工夫を行った。ディスクタイプのセラミックの場合、両面に TiN コーティングを施す必要があるが、DC スパッタ法を両側 2 ヶ所から行うことで一度に実施でき、作業工程の短縮につながる。TiN コーティング以外にも、 Cr_2O_3 コーティングにより同様に二次電子放出係数が下がり、安く行える可能性がある。

3) コスト削減の評価

コスト削減の見通しとしては、TiN コーティングの工程が完全にスキップされ、安いセラミック材料が見つかり、コストが安くかつ信頼性のある銅メッキ工程が見出されると、カプラ全体のコストに対し 10～20%程度のコスト削減が可能であると考えられる。

4) 研究開発に必要な期間および費用

今後の開発項目を優先度の高い順に以下に列挙する。

(1) セラミックの二次電子放出係数測定

セラミックの二次電子放出係数はマルチパルサ放電の影響を見積もるのに最適なパラメータであり、かつカプラの性能を決める重要なものである。セラミックは絶縁体のためパルス型の電子ビーム照射を行う必要がある。

(2) TiN コーティング無しのセラミック材の開発

これまでに行ってきた国内メーカーとの共同研究の結果から、セラミックの二次電子放出係数は超音波洗浄により低下しているようであるということが分かっている^[III-6-6]。一方、高い誘電正接については材料そのものの問題であるため超音波洗浄を行っても効果は無く、今後の開発方向としては、二次電子放出係数を変えることなく、低誘電正接の材料を開発するということになる。目標値としては、超音波洗浄後の二次電子放出係数が 2 程度で、誘電正接が 5×10^{-4} 程度の材料を今後 2～3 年かけて開発することになる。現在行っているコーティング無しのセラミックを用いたカプラでも定格パワーにはほぼ到達し

ているが、同じメーカーが製造している別のセラミックは二次電子放出係数が 4.6 (超音波洗浄前の数値) で、誘電正接が 1×10^{-4} であり有望なセラミック材料にみえる [III-6-7]。

以上で得られた結果を元に、プロトタイプのカプラを 2 本製作し、テストベンチにて大電力試験を行えると実機に対する性能評価が可能となる。また、全ての問題が解決された後、実機用カプラを 2 本製作し、同様にテストベンチにて大電力試験を行った後、最後はクライオモジュールに組み込んで ILC と同様の運転条件にて性能評価を行うことで実用可能性が示せるものと考ええる。これらの研究開発の流れを模式的に示したものが図 III-6-5 である。研究開発スケジュールと必要な予算を表 III-6-3 にまとめる。5 年間、総額 4,200 万円程度と考えられる。

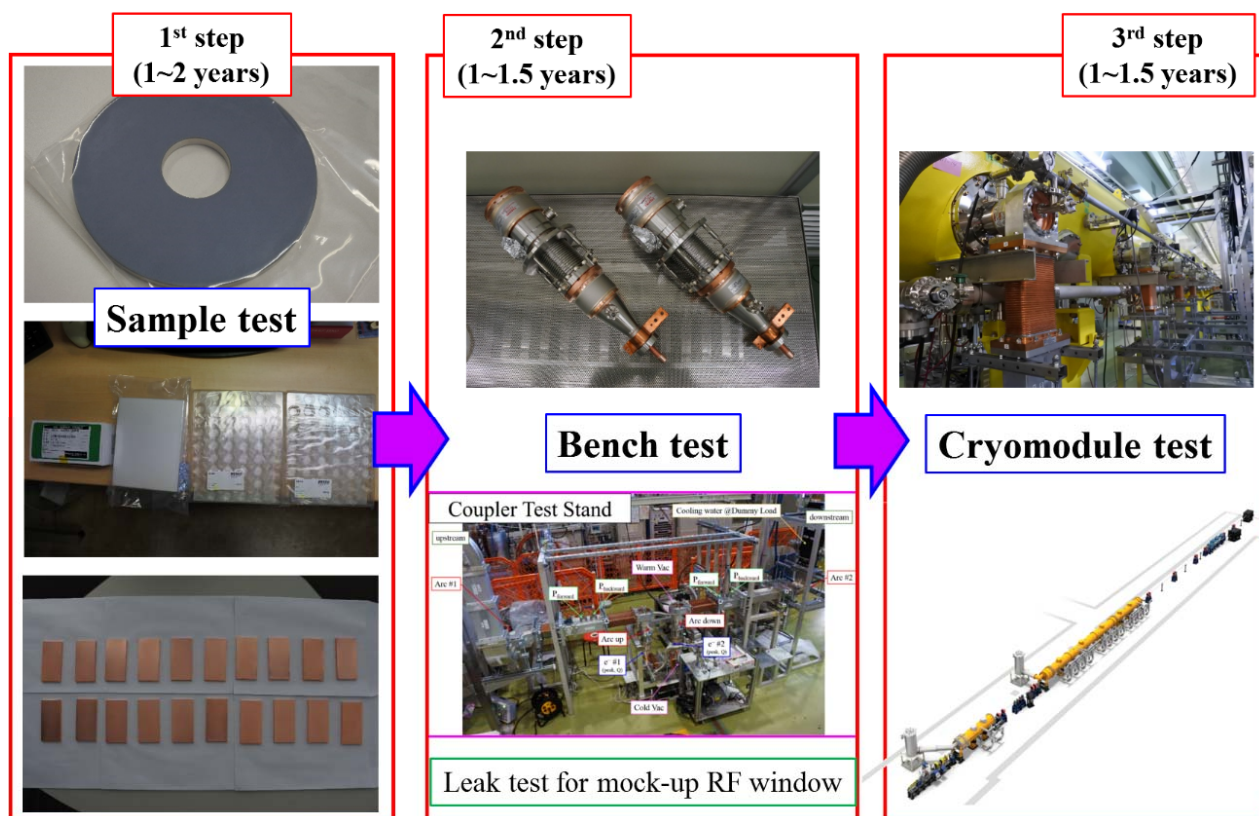


図 III-6-5 本調査・研究の流れ（現在は第一段階にある）

表 III-6-3 本調査・研究のスケジュールと必要な予算

R&D Items	Budget	1 st year	2 nd year	3 rd year	4 th year	5 th year
Ceramic property	k¥ 8,000					
Copper plating	k¥ 2,000					
Preparation work	k¥ 1,000					
Design & Fabrication	k¥ 1,000					
Prototype coupler for bench test	k¥ 15,000					
Real coupler in C.M.	k¥ 15,000					

参考文献

- [III-6-1] E. Kako *et al.*, “Advances and Performance of Input Couplers at KEK”, pp. 485-490, SRF2009, Berlin, Germany.
- [III-6-2] E. Kako *et al.*, “Quality Control of Copper Plating in STF-2 Input Power Couplers”, MOPB061, SRF2017, Lanzhou, China.
- [III-6-3] LCWS 2013, <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/lcws13/>
- [III-6-4] Y. Kijima *et al.*, “Input Coupler of Superconducting Cavity for KEKB”, pp. 2040-2042, EPAC2000, Vienna, Austria.
- [III-6-5] Y. Yamamoto *et al.*, “STF-2 Cryomodule Performance and New Input Coupler R&D for ILC”, PoS(ICHEP2016)066, ICHEP2016, Chicago, U.S.
- [III-6-6] Y. Yamamoto *et al.*, “Power Coupler R&D in KEK”, LCWS2017, Strasbourg, France.
- [III-6-7] K. Iwamoto *et al.*, “Preliminary Study of Low SEE Coefficient Alumina for Coupler Window”, TTC Meeting 2014, KEK, Japan.

7. 電解研磨

1) 研究開発の概要

ILC のコスト削減に向けて、平均加速電界 35 MV/m の超伝導加速空洞の開発が進められている。RF としては、ILC 用超伝導加速空洞の製造後、加速性能を出すために行う表面処理プロセスは、製造した全空洞に必要である。そのプロセスは、電解研磨処理、超音波洗浄処理および超純水高圧洗浄からなり、1 台の空洞あたり 2 回のプロセスを行い、ILC 仕様の加速勾配性能が出ない場合にはさらにもう 1 回プロセスすることになっている。TDR における表面処理プロセスのフロー図を図 III-7-1 に示す。



図 III-7-1 TDR における超伝導加速空洞の表面処理フローの全体図。黄色いボックス部分が電解研磨プロセスである。また、濃い青のボックス部分が超音波洗浄プロセス、薄い青ボックスが超純水高圧洗浄プロセスである。

このプロセスには、電解研磨設備や超純水製造装置の設備投資と維持保守費が必要であるが、消耗品として電解液の購入費と使用後の廃液処理費、洗浄水の酸性排水処理費、そして作業員の人件費が必要である。また、2 回めのプロセスの後には、クリーンルーム内でのアンテナや閉止フランジの取付け作業

および 120℃ベーク作業を行うので、その人件費が必要である（図 III-7-2～III-7-4）。

このプロセスに対して行うコスト削減は、空洞の台数が多いのでその削減効果は非常に大きい。

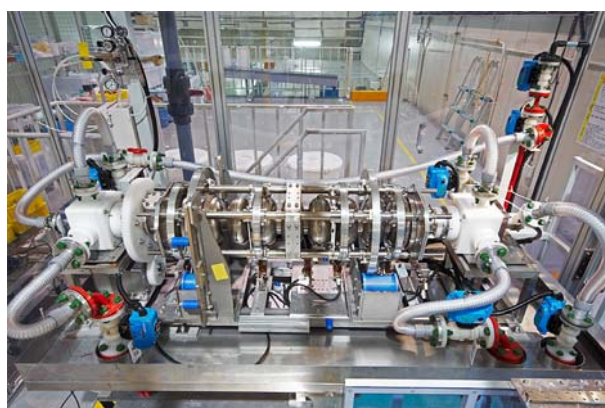


図 III-7-2 （上図）電解研磨設備の例。全体が簡易クリーンルーム内に囲まれ、右から順に電解研磨装置、超音波洗浄装置、超純水高圧洗浄装置、洗浄ハットと並んでいて中央に重量物をあつかう簡易クレーンが設置されている。（下図）電解研磨装置本体



図 III-7-3 超音波洗浄設備および超純水高圧洗浄設備の例



図 III-7-4 クリーンルーム内でのアンテナや閉止フランジの取付け作業、および 120℃ベーク作業の例

2) 縦型電解研磨およびバイポーラ電解研磨

コスト削減効果のある電解研磨処理の候補は、縦型電解研磨設備とバイポーラ電解研磨方式の採用である。縦型電解研磨では、空洞の電解研磨装置への設置および処理位置を縦型とし設備構造の簡素化をはかり、また、横型電解研磨では空洞を回転させていたが、縦型電解研磨の時には空洞は固定で内部電極カソードのみを回転させる簡素化構造である。これらの簡素化構造により設置専有面積を小さくする。縦型電解研磨装置の開発事項は、カソード電極の形状や発生する水素泡を空洞内面に触れさせない方法などである。縦型電解研磨装置にさらにパルスの極性を交互に変える電圧を印加するバイポーラ電解研磨では、濃硫酸とフッ化水素酸の混合液を、希硫酸溶液に置き換えることが可能となり、電解液循環装置の製造コスト低減と廃液処理コストの低減が可能になると考えられる。また、危険度の極めて高いフッ化水素酸を扱う作業より希硫酸を扱う作業では危険度リスクが大幅に下がり、かかる人件費も下がるものと考えられる。図 III-7-5 に縦型電解研磨装置の開発途中の装置の写真を示し、内部のカソード電極には研磨時には液攪拌を行い、挿入時には格納されるウィングの模式図を示す。

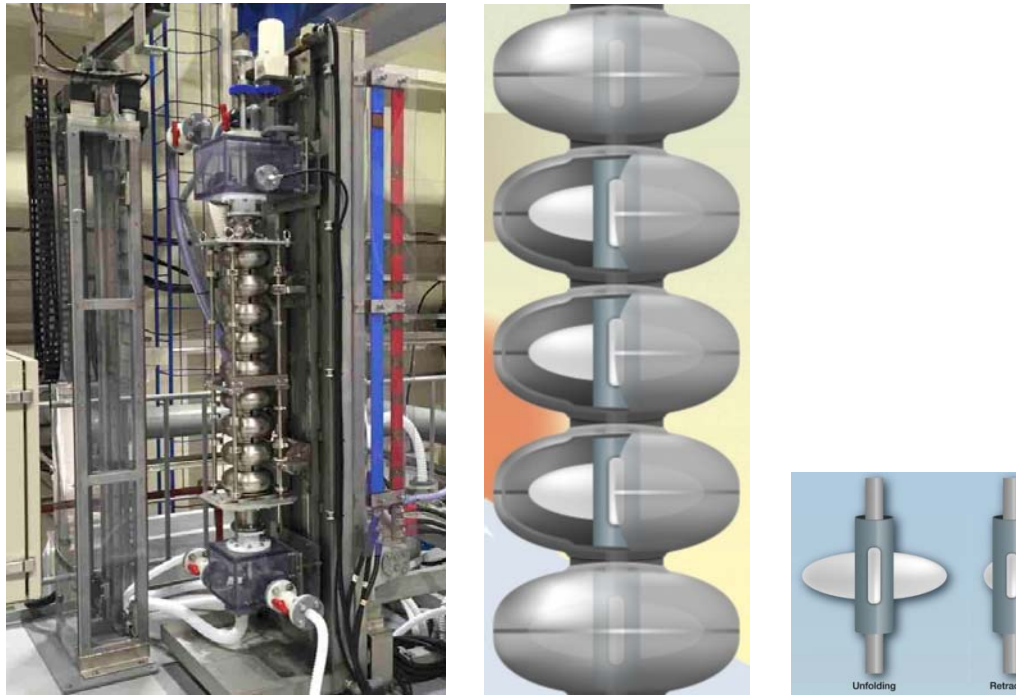


図 III-7-5 縦型電解研磨の装置の例と内部電極の模式図。内部の電極には電解液の攪拌用ウィングが内蔵されている。

縦型電解研磨装置に応用するバイポーラ電解研磨には、通常の電解研磨で単極性の直流電源を使うところを、両極性でパルス電圧を繰り返し発生できる電源が必要である。+側のパルスの電圧とパルスの時間幅、電圧をかけない時間幅、そして一側のパルスの電圧とパルスの時間幅、そして、全体の繰り返し周波数、というパラメータの最適化の探索およびカソード電極形状のさらなる最適化が必要である。その電圧波形の模式図を図 III-7-6 に示す。

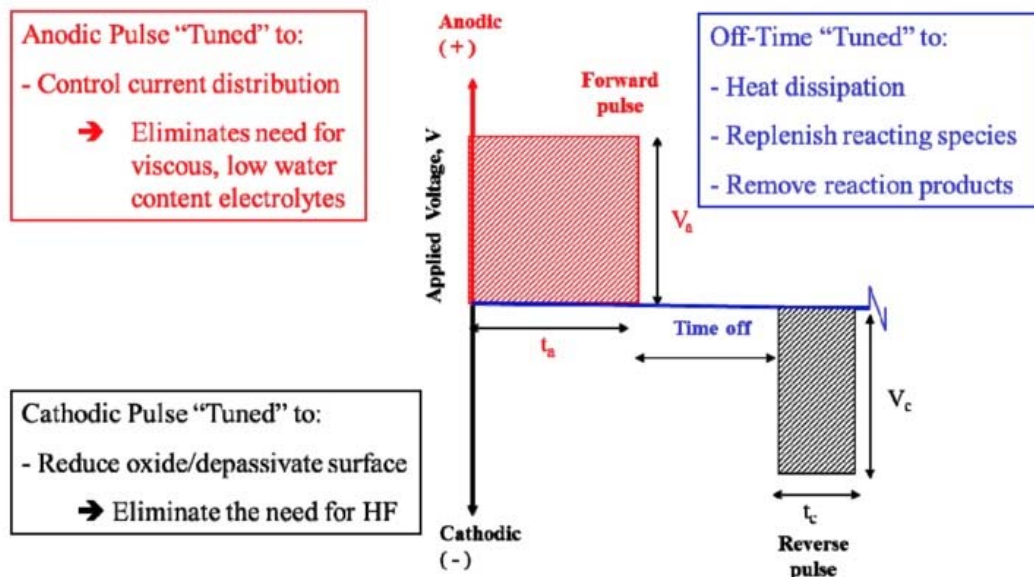


図 III-7-6 バイポーラ電解研磨の電圧パルスの模式図

3) コスト削減の評価

この装置の開発、実用化によって期待されるコスト縮減効果は、

- (1) 電解研磨装置の設備コスト： 横型電解研磨装置の設備コストの～50%
- (2) 電解液購入費および廃液処理費や人件費のプロセスコスト：

横型電解研磨時のプロセスコストの～50%

である。米国企業によるコスト削減見積^{III-7-5)}があるが、そこでは設備コストは横型装置の 54%、プロセスコストは横型装置の 21%と見積もられているが、日本企業によるコスト削減見積^{III-7-6)}では、双方とも 50%程度という数字もあるので、ここでは大きい方の 50%の値を採用することにする。これは、超伝導高周波系 (SRF) 部分のコストに対して約 7.7%減であり、TDR 全体のコストに対しては約 2.6%減と見積もられる。研究開発の成果を 50～100%とすると、1.3%～2.6%のコスト削減が期待できる。

4) 研究開発に必要な期間および費用

縦型電解研磨装置の問題点は、横型電解研磨装置で解決できていた水素泡の問題、すなわち、カソード電極から発生する水素泡が空洞内面まで拡散し接触することで、その部分の研磨量が増し研磨面が荒れることを縦型の姿勢で解決しなければならないことである。バイポーラ電解研磨の問題点は、フッ素を使用した電解研磨で滑らかな研磨が実現しているところを、フッ素による研磨ではなく極性が短い時間で交互に変わる電氣的研磨方法において研磨面の滑らかさを実現するところである。まとめると、

- (1) カソード電極から発生する水素泡除去の開発
- (2) バイポーラ電解研磨時の電氣的パラメータの開発および最適な電解液の選択

である。これらを、単セル空洞の場合、そして 9 セル空洞の場合、と段階的に実現してゆく必要がある。単セル空洞に対する縦型電解研磨は完成の域に達しているが、9 セル空洞に対する縦型電解研磨には、引き続き 1 年半程度必要である。また、バイポーラ電解研磨については、単セル空洞に約 1 年半、次に 9 セル空洞に約 1 年半の合計 3 年かかると見込まれる。これらを並行して進めるスケジュールとして、図 III-7-7 が考えられる。



図 III-7-7 縦型電解研磨とバイポーラ電解研磨の開発スケジュール

これらの技術開発についての世界の動向は以下のとおりである。縦型電解研磨装置開発は、米国コーネル大学で実用化がされており、単セル空洞と 9 セル空洞で常時加速勾配性能が達成されている^{III-7-1)}。フランス原子力庁サクレ研究所でも装置開発が行われており単セル空洞で性能達成がなされている^{III-7-2)}。米国ジェファーソン研究所では開発が始まったばかりである。一方、KEK では、企業との共同開発

を行っており、単セル空洞では性能達成をしたばかりであるが、9セル空洞用の開発はまだ開発途上である[III-7-3]。

もう一つの重要な技術であるバイポーラ電解研磨では、米国の企業がコーネル大学、フェルミ研究所と共同で単セル空洞と9セル空洞で開発を行なっている途上で、単セル空洞では数例において電界性能が達成された[III-7-4]。KEKにおいては、企業と岩手大学との共同研究、KEKともう一つの企業との共同研究を、小さなサンプルベースで行なっていて、空洞にはまだ応用できていない。

開発に要する経費は、

縦型電解研磨装置の設備開発	1億3,000万円
単セル空洞を使用した開発	5,000万円
9セル空洞を使用した開発	2,000万円
表面処理のプロセス人件費	3,000万円
ポスドク雇用費（2年）	1,400万円

と見込まれる。

参考文献

- [III-7-1] F. Furuta, et.al., “Multi-cell VEP Results: High Voltage, High Q, and Localized Temperature Analysis”, Proc. of IPAC2012, New Orleans (2012)
- [III-7-2] F. Eozenou, et.al., “Vertical Electropolishing of SRF Cavities and Its Parameters Investigation”, Proc. of SRF2013, Paris(2013)
- [III-7-3] V. Chouhan, et.al., “Study of the Surface and Performance of Single-cell Nb Cavities After Vertical EP Using NINJA Cathodes”, Proc of LINAC2016, Michigan (2016)
K. Nii, et.al., “Development of new type “NINJA” Cathode for Nb 9-Cell Cavity and Experiment of Vertical Electro-polishing”, Proc of LINAC2016, Michigan (2016)
- [III-7-4] A.M.Rowe, et.al. “Bipolar EP: Electropolishing without Fluorine in a Water Based Electrolyte”, Proc. of SRF2013, Paris (2013).
- [III-7-5] E.J.Taylor, et.al., “Economics of Electropolishing Niobium SRF Cavities in Eco-friendly Aqueous Electrolytes without Hydrofluoric Acid”, Proc. of SRF2015, Whistler (2015)
- [III-7-6] マルイ鍍金工業、KEK、東日本機電開発、WING、岩手県工業技術センターの共同研究コラボレーション内の議論。

8. 超伝導薄膜

1) 研究開発の概要

超伝導加速空洞の加速電場の限界は空洞内表面に欠陥がなければ表面物質の持つ臨界磁場 H_c で決まると考えられる。ニオブ加速空洞内面に超伝導体による多層薄膜構造を作ると臨界磁場を上げられ、加速電場の限界を引き上げることが可能になり、リニアコライダー加速器の短縮化が実現する。また、RF 電磁場にさらされる最表面のどの性質が残留抵抗、すなわち RF 損失を決めているのか、すなわち種々の不純物（水素や酸素など）の含有の割合あるいはトラップされた磁束のピン止め効果かの物理的描像が描けた時に低損失の加速空洞も実現できる道筋が開ける。

加速電界を上げる研究は古くから行われており、特に臨界磁場を上げることで熱的超伝導破壊を防ぐことが研究されてきた。例えば、上部臨界磁場 H_{c2} の高いニオブスズ (Nb_3Sn) の応用は、1970 年代からブッパータル大学などで研究されてきた^[III-8-1]。これは臨界磁場が高くなることでより空洞内面が強い磁場に耐えられ、熱的超伝導破壊が防げるため、空洞の加速電界を上げられる。超伝導薄膜を応用した高電界化は 2006 年にグレビッチにより提案され^[III-8-2]、それを契機に現在世界中で超伝導薄膜の研究がなされている。その超伝導薄膜の研究は現在 サクレ研究所、SLAC、米国・アルゴンヌ国立研究所、コーネル大学、ジェファーソン研究所、フェルミ研究所などで行われている。日本では先行研究として光延らによる銅空洞への二ホウ化マグネシウム (MgB_2) の成膜がある。超伝導薄膜を用いた高い臨界磁場の達成方法は、一般的な超伝導加速空洞の材料であるニオブに対して、更に高い臨界磁場を持つ材料であるニオブスズや窒化ニオブ (NbN)、二ホウ化マグネシウムを表面に薄膜としてコーティングする方法である。現在の薄膜研究の最前線は、サンプル面への塗布方法の開発、そしてその塗布された薄膜の H_c 計測が行われているが、ニオブ空洞で達成できる耐磁場（約 200 mT）の半分以下に留まっている。

2) 超伝導体多層薄膜

ILC の超伝導加速空洞の内面に Nb_3Sn 超伝導体多層薄膜（図 III-8-1）を生成することにより、到達容易な 4K の温度で、ニオブ臨界磁場の 2 倍程度高い臨界磁場（約 400 mT）が予想されていることから超伝導加速空洞として 2 倍の加速勾配の実現の可能性がある。しかしながら、その予想されている加速勾配は、理論的限界値であるので、10-20 年程度の技術開発では 80%程度までしか達成できないとみるのが現実的である。すなわち、20 年程度の開発期間のあとの達成目標を 4K の温度での運転で、55 MV/m $Q_0=2 \times 10^{10}$ とする。そのためには表面残留抵抗値を極限まで下げ、空洞表面の残留磁場を極限まで排除し、空洞表面の超伝導体多層薄膜は RF により作られる高磁場に耐えて超伝導状態を維持するものでなければならない。これを実現するのが平滑な高純度ニオブ表面に一樣な膜厚で精密に多層超伝導体薄膜 (NbN , MgB_2 , Nb_3Sn など) をコーティングする技術である。原子層堆積 (ALD: Atomic Layer Deposition) 成膜は複雑な構造の加速空洞内面に直接薄膜をコーティングすることができる可能性のある技術である^[III-8-3]。半導体集積回路の製造時に金属薄膜や絶縁体薄膜としての実績、そして導電性梱包材や装飾材としてプラスチックフィルム材の上への金属薄膜生成としての実績などがあるが、 NbN 、 MgB_2 、 Nb_3Sn などの臨界温度や臨界磁場の高い超伝導体の多層薄膜製造は報告が少なく、それらの薄膜製造自体に独自性と独創性のある開発が必要である。また、この開発に成功すれば、超伝導加速器への応用以外にも超伝導量子コンピューターの超伝導素子への応用も期待でき、広い応用範囲が期待できる。

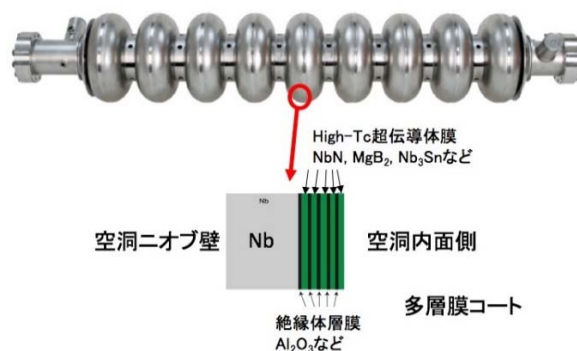


図 III-8-1 TDR における超伝導加速空洞の内面に高い転移温度を持つ超伝導体膜と絶縁体膜とを交互に多層膜コートすることでニオブより高い臨界磁場を持たせることができ、加速勾配を上げられる可能性がある。

ALD は、図 III-8-2 に示すように、異なった反応性ガスをミリ秒精度で成膜基板表面に導入し、原子層を積み重ねてゆくものである。この時、基板温度は最適に高められ、導入ガスはプラズマ加熱されて反応性を高めてある。現在構築中の ALD 成膜装置はサンプル基板と単セル空洞への成膜に対応でき、またいろいろなプリカーサー（薄膜生成用反応性ガス）にも対応できる。しかしながらガスフロー制御が手動であったり、温度制御やプラズマ生成制御が簡易のものなので精密なパラメータ制御が不十分であり、表面分析から酸素などの不純物の混入が示唆されているので、純度の高い成膜に問題がある。精密なパラメータ設定で成膜を繰り返し試験し、最良の条件を探し出すためには装置から不純物混入の要因を取り除き、その制御機器の高精度自動化開発が必要である。

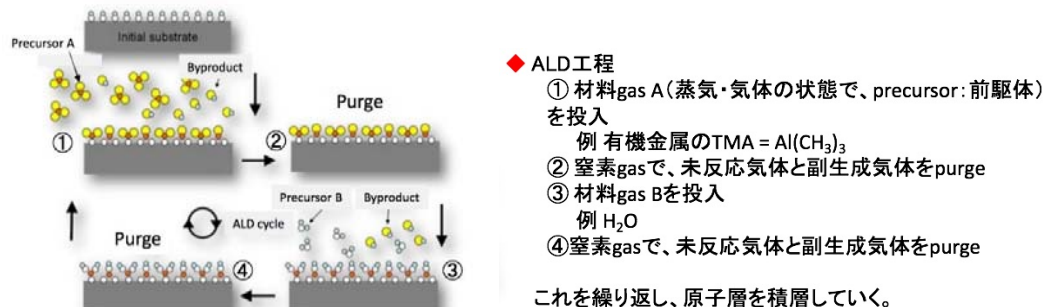


図 III-8-2 ALD 工程の説明図

サンプル片に対する ALD 成膜技術が確立した後は、単セル空洞へ応用する開発、そして 9 セル空洞へ応用する開発が必要である。並行して、どの超伝導体のどの成膜方法が優れているかをサンプルで試行し、臨界磁場性能を評価しなければならない。そのための臨界磁場計測装置開発も必要である。

3) メッキ法

超伝導 Nb_3Sn 線材の製造方法を超伝導加速空洞に応用する手法の開発^[III-8-4]がフェルミ研究所とジェファーソン研究所および KEK の共同で進められている。これは、ニオブ基板の上に薄い銅メッキを施し、その上にスズメッキを施し、最後に再び銅メッキを施してから、 700°C の熱処理を行うものである。そうするとニオブ基板の上に Nb_3Sn 層が形成され、最表面はブロンズが形成されるので、最表面のブロンズ

を酸でエッチングして取り除き、最表面を Nb_3Sn 層にする、という手法である（図 III-8-3 参照）。高純度ガスフロー制御の必要な ALD 法と比べ、それほど純度の要らないメッキ制御で実現できそうなので有望視されている。ALD 法とメッキ法の両方を追求して最終的に性能の良い方の成膜法を選択することになるであろう。

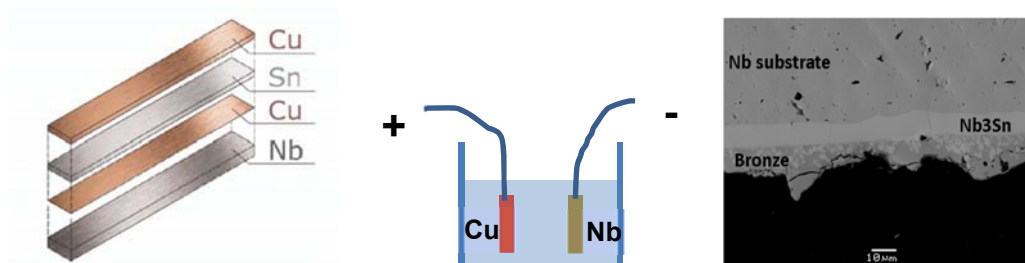


図 III-8-3 メッキ法による Nb 基板の上への Nb_3Sn 薄膜の製造方法。右端の写真はサンプル片にメッキ法を施し、その切断面を SEM で観察したものである。

4) コスト削減の評価

10 年後にこの技術の開発、実用化によって期待されるコスト削減効果は、4K 温度での Q 値の増加 (2×10^{10}) および従来の 2K 温度での加速器運転をヘリウムの液化温度である 4K 温度域での加速器運転を可能とすることによるものである。主線形加速器・電子源・陽電子源・RTML 部分のヘリウム冷凍機に対して 2K コールドボックスの削除および減圧ポンプの削除が可能となり、それらはその冷凍機コストの 25～50%の削減に相当する。

さらに、将来的に高電界の運転が可能となれば、クライオモジュール数の削減とトンネル長の縮小が期待できる。

5) 研究開発に必要な期間および費用

開発の第 1 ステップはプリカーサーが入手しやすい NbN 薄膜の ALD 成膜技術を完成させ、超伝導体として機能する薄膜を完成させ、空洞に応用することである。第 2 ステップでは、もっと高い臨界磁場が見込める Nb_3Sn 薄膜の成膜を完成させ、空洞に応用することである。このとき、メッキ法による Nb_3Sn 薄膜成膜も同時開発しておく。これらを、単セル空洞の場合、そして 9 セル空洞の場合、と段階的に実現してゆく必要がある。ALD 装置開発に約 2 年かかると見込まれ、その後単セル空洞応用に十分な成功統計を得るために約 4 年、次に 9 セル空洞応用に成果を得るために約 4 年の合計 10 年かかると見込まれる。それらと平行して臨界磁場性能評価装置の開発にも約 4 年かかるものと見込まれる。これら 10 年の開発期間を費やしたとしてもいままでの SRF 開発経験から推定して現状のニオブ空洞と同等程度の性能の 35 MV/m に到達できるかどうか、である。その後、加速電界を上げていき 55 MV/m にする開発にさらに 10 年はかかるものと推定する。よって合計 20 年以上の先に 55 MV/m の技術的展望が開けるものと推定する。そのスケジュールを図 III-8-4 に示す。

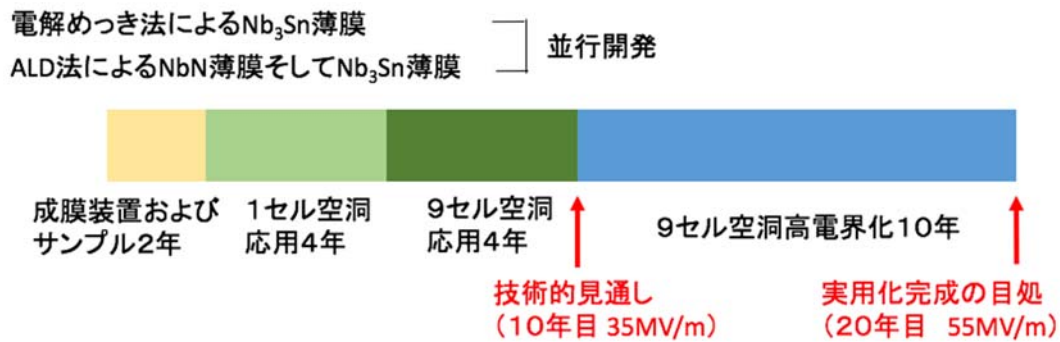


図 III-8-4 推定される開発スケジュール

これらの技術開発についての世界の動向は以下のとおりである。超伝導体薄膜の研究は世界中で競って行われており、おもな研究機関は、フェルミ研究所、ジェファーソン研究所、コーネル大学、サクレ研究所、ブッパータル大学などであり、スパッタ法が主流であるが、フェルミ研究所はスパッタ法と並行してメッキ法も追求している[III-8-5]。ALD 研究は主に KEK とサクレ研究所が追求を行なっている。どの研究機関も十分な性能の薄膜を製造できていないのが現状である。

10 年で技術的可能性を見極めるための開発に要する経費（10 年）は、

ALD（あるいはメッキ）成膜装置の設備開発	1 億円
単セル空洞を使用した開発	1 億円
9 セル空洞を使用した開発	1 億円
臨界磁場計測装置インフラ整備と評価用空洞 30 台製造	5 億 5,000 万円
空洞性能評価費用	1 億 4,000 万円
表面分析費用	1 億 4,000 万円

と見込まれる。現状のニオブ空洞の 1.6 倍もの高電界 55 MV/m を目指す実用開発には、さらに 10 年、そして上の 2-3 倍程度の実用開発費用が必要であると見込まれる。

参考文献

- [III-8-1] G. Mueller et.al. Proc. of EPAC1996, Sitges, Spain (1996)
S. Posen, et.al. Supercond. Sci. Technol. 30 (2017) 033004
- [III-8-2] A. Gurevich, APL 88 (2006) 012511,
T. Kubo, Y. Iwashita, T. Saeki, APL 104(2014) 032603
T. Kubo, Supercond. Sci. Technol. 30, 023001 (2017)
- [III-8-3] S. Kato, H. Hayano Proc of SRF2017 Ranzou (2017)
- [III-8-4] S. Franz et.al. Materials Letters 161(2015) 613-615
E. Barzi “Innovative Nb₃Sn thin film approaches and their potential for Research and Applications” CEC/ICMC, Madison (2017)
- [III-8-5] Anne-Marie Valente-Feliciano “Superconducting RF materials other than bulk niobium: a review” Supercond. Sci. Technol. 29 (2016) 113002

9. 液圧成形

1) 液圧成形空洞の概要

楕円のセル形状を有する超伝導加速空洞の製造方法は、圧延したニオブの板材をおわん状にプレス加工し、それらを電子ビーム溶接（EBW）で結合する方法が一般的である。空洞は内面が滑らかなことが要求されるが、EBW の電子銃は大型のため空洞の外側から貫通溶接を行い、隆起の少ない滑らかな溶接裏ビードを形成する必要がある。これは熟練を要する非常に難しい溶接作業である。EBW 機の導入コストも高く、EBW が空洞製造コスト上昇の主要因である。そこで EBW を用いずに塑性加工の一つである液圧成形を用いて空洞を低コストで製造する研究が行われている。この工法は古くから知られ、自動車部品や油圧部品の製造に広く用いられている。液圧成形はパイプの外側に金型を配置し、パイプの内側を高圧にして軸方向に圧縮することにより、金型に沿って変形させるものである。液圧成形による空洞の製造では、ニオブパイプにくびれ加工を行った後、油圧によって空洞に変形させる。

液圧成形による空洞の製造方法

以下に液圧成形による空洞製造方法に関して詳細を述べる。

① 予成形と液圧成形

予成形と液圧成形の工程を図 III-9-1 に示す。図は 3 セル空洞の場合を示している。まず、パイプが液圧成形の金型に入るように予成形を行う。図 III-9-2（左）に示すネッキング加工機を用いてアイリス部にくびれを成形する。ニオブパイプを回転させ、対向する 2 枚のローラをパイプに押し込むことによりくびれを形成する。加工機の構成はスピニング加工機と同じである。ローラはパイプに連れ回しする。ローラとパイプの間に潤滑剤は用いていない。パイプをローラ近傍の左右両側でコレットチャックにより把持し、くびれを 1 ヶ所ずつ成形する。1 セル空洞の場合は 2 ヶ所となる。予成形終了後、真空炉を使って 750℃で 3 時間焼鈍を行う。

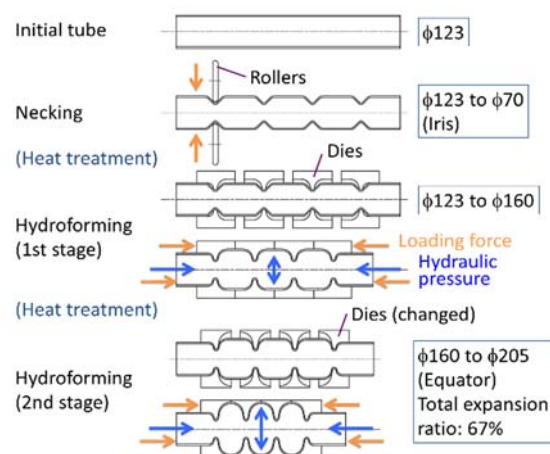


図 III-9-1 液圧成形の工程



図 III-9-2 ネッキング加工機（左）、成形が完了したニオブパイプ（右上）、完成した 1 セルの空洞（右下）

液圧成形は図 III-9-1 に示したように 2 段階で実施する。外側に金型を配置して、パイプに内圧を加え、さらにパイプの両端を押え込む。金型の外周は円筒形状であり、長いシリンダーの中に配置され長手方向に移動可能である。金型同士が密着するまで押し込み、内圧を 25 MPa まで上げてしばらく保持し、パイプを金型に密着させる。その後、金型を外して再び焼鈍を行う。次に金型を交換して最終成形を行う。軸押し込み力は油圧ピストンで発生させる。ここでは膨らむ様子を目視で確認しながら、内圧と軸押し込み力を手動で調整する。なお、流体として油を使用している。成形が完了したニオブパイプを図 III-9-2（右上）に示す。

② 空洞への仕上げ

図 III-9-2（右上）に示したパイプを 2 ヶ所のくびれ部分で切断し、左右にビームパイプを EBW で接合する。端部にはニオブチタン製のフランジを取り付ける。こうして完成した 1 セル空洞を図 III-9-2（右下）に示す。液圧成形で空洞を製造する場合、図 III-9-3 に示す様に空洞内部が荒れることが多い。この場合、機械研磨を行う。通常は超伝導加速空洞内面の機械式研磨に実績のあるバレル研磨を施す。これは空洞内部に研磨剤と水を入れて空洞を回転させることにより、空洞内面を研磨する。

2）世界的な動向



図 III-9-3 液圧成形後の空洞内部

(1) 他施設での動向

液圧成形による空洞製造に関する研究は 1980 年代から欧州合同原子核研究機関 (CERN)、コーネル大学などによって行われてきた^[III-9-1,2]。1990 年代に入ると DESY やサクレ研究所でも液圧成形による空洞製造が行われ、サクレ研究所では 1.3GHz の単セル空洞の製造に成功している^[III-9-3,4]。近年では主に DESY において、W. Singer らによっていくつかの空洞が液圧成形によって製造された^[III-9-5]。DESY では TESLA 形状の単セル、2 セル、3 セルのテスト空洞をいくつか製造しており、単セル空洞の一つに関しては最高加速勾配 42 MV/m という高い加速勾配を達成している。また、空洞内径 150 mm、肉厚 2.7 mm のニオブシームレスパイプを用いて同形式の 3 セル空洞を液圧成形によって製造し、これを 3 台 EBW で結合して 9 セル空洞も製造している。製造された 9 セル空洞の最大加速勾配は 30~35 MV/m に達した。ただし、DESY でも 9 セル空洞を一つのニオブパイプから製造していない。

(2) KEK での動向

KEK は 1994 年より液圧成形の研究に着手した。藤野らは空洞コスト低減のために薄肉のニオブと厚肉の銅を接合したクラッド材を用いてシームレスパイプを製造し、これを液圧成形にて 1 セル空洞に仕上げ、最大加速勾配 40 MV/m を得た^[III-9-6]。その後、上野らによりくびれ加工機と液圧成形機が開発され^[III-9-7,8]、KEK はシームレスパイプから空洞に仕上げる一連の工程を所内で実施できるようになった。

その後、フェルミ研究所と米国・ロスアラモス国立研究所との共同研究によりシームレスニオブパイプを用いて TESLA-like 型^[III-9-9]の 1 セル空洞 (図 III-9-2 (右下)) と 3 セル空洞 (図 III-9-4) の製造に成功している。1 セル空洞は完成した後、フェルミ研究所で遠心バレル研磨を行った。その後、通常の表面処理を行い、性能評価を行った結果、図 III-9-5 (左) に示すように最大加速勾配 36 MV/m を達成した^[III-9-10]。また、3 セル空洞に関しては完成後にバレル研磨を行わず通常行う電解研磨 (計 115 μm) のみで性能評価に挑んだ。性能評価の π モードでの結果を図 III-9-5 (右) に示す^[III-9-11]。この 3 セル空洞の場合、すべてがセンターセルの形状で製造されているため、加速電場の平坦度が出ていない。このため、 π モードの測定において、両端のセルの加速勾配に対し、中央のセルは 1.43 倍の加速勾配になる。図 III-9-5 (右) において、横軸には両端のセルの加速勾配と中央のセルの加速勾配を示す。図から分かる様に、加速勾配が中央のセルでは 32 MV/m に達した。ILC 仕様の 35 mV/m には達しなかったが、このような荒れた内面形状で加速空洞として使用できるのは、非常に驚くべきことである。ちなみに空洞内部の表面粗さは、通常の電解研磨後の空洞が 0.1 μmRa 程度なのに対して、この 3 セル空洞に関しては 9.1 μmRa だった。



図 III-9-4 KEK で液圧成形により製造された 3 セルの空洞

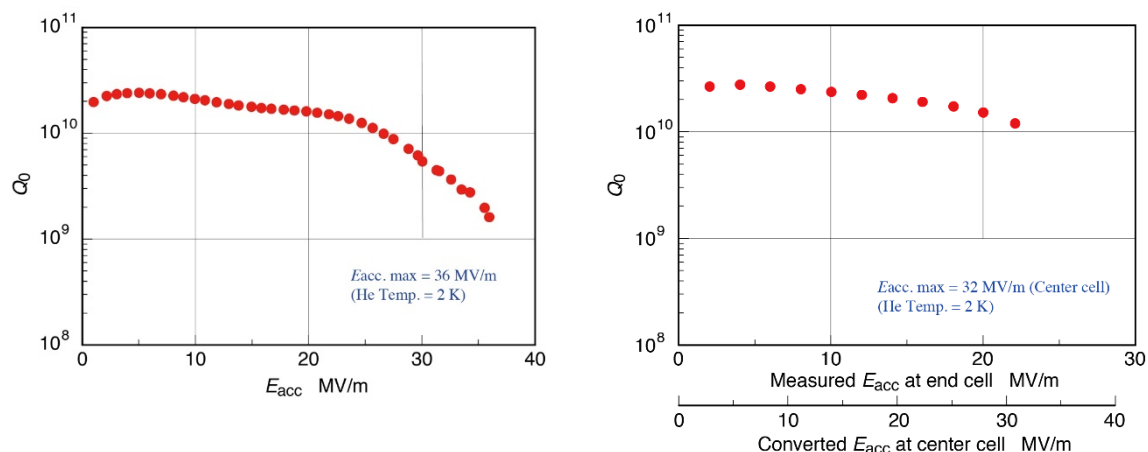


図 III-9-5 1 セル空洞の性能評価結果（左）、3 セル空洞の性能評価結果（右）

また、シームレスパイプの国産化を目指し、KEK と国内企業とで液圧成形空洞の材料となるシームレスニオブパイプの製造に関する共同研究を行っている。実際にアルバック社の製造したシームレスニオブパイプを用いて KEK で液圧成形による 1 セル空洞の製造に成功している。この空洞は日本国内の企業でバレル研磨を行った後、性能評価で 37 MV/m を達成した [III-9-12]。また現在はアルバック社による 3 セル空洞用のシームレスニオブパイプの製造および KEK での液圧成形も完了し、性能評価に向けて準備中である。更に、アルバック社ではシームレスニオブパイプの結晶粒径・方位の解析も行い、成形時に破断しにくいパイプの製造方法に関しても研究を進めている [III-9-12]。

また、KEK では液圧成形技術の向上を目指し、ベロー製造を行っている会社との共同研究も開始した。現在は、KEK での液圧成形による空洞製造の技術伝達を行い、今後は液圧成形による 9 セル空洞の製造を目指す。

3) コスト削減の評価

表 III-9-1 に液圧成形によって削減が期待されるコストの試算をまとめた。これまで述べてきたように、EBW を用いた通常の空洞の製造方法ではニオブシートを用いるが、液圧成形による空洞の製造の場合はシームレスニオブパイプが必要となる。この場合、材料コストに関しては従来の工法と比較して液圧成形では 2 倍程度の費用がかかると予測される（ただしこの値に関しては今後の開発状況などに応じて変化する可能性もある）。これに対し、製造コストに関しては従来のおよそ半分程度のコストに抑えることが可能である。トータルコストで考えたときに液圧成形では従来の製造コストに比べおよそ 25% 程度のコストの削減が見込まれる。研究開発の成果を 50~100% とすると、12~25% のコスト削減が期待できる。

表 III-9-1 削減が期待されるコストの試算

工法	製造コスト	材料コスト	トータルコスト	削減率
従来 (プレス+EBW)	5	1	6	-
液圧成形	2.5	2	4.5	25%

4) 研究開発に必要な期間および費用

上記のように、DESY では液圧成形による 3 セル空洞をつなぎ合わせ 9 セルの空洞を製造したが、この方法ではコスト低減には不十分であり、1 本の長尺パイプから 9 セル空洞を製造することが必須である。このためには、1,800 mm 長のニオブパイプが必要となるが、現在のところ米国の企業である ATI Wah Chang 社のみしか製造は行っていない。現在の液圧成形による空洞製造に関連する事項の開発状況に関して、表 III-9-2 にまとめた。今後コスト低減を目指してゆくにあたっては、ほかの企業による 9 セル空洞用の長尺のシームレスニオブパイプの製造も必要である。また、ILC で大量の空洞が必要となることを考慮すると、歩留まり向上のためにも安定して高品質かつ安価なパイプを供給できる技術も確立されなければならない。

表 III-9-3 に今後の液圧成形による空洞製造を導入するのに必要だと考えられる開発内容、および必要と考えられる年数と費用をまとめた。液圧成形の技術に関しては、現在はまだ 3 セル空洞の製造までしか成功しておらず、今後 9 セル空洞の製造技術の確立が必須となる。これには主に製造工程でのパラメータの最適化などが含まれ、1～3 年程度の期間を見込んでいる。9 セル空洞の製造技術を確立した後は、歩留まりの向上が目標となる。このために少なくとも 10 台以上の 9 セル空洞を液圧成形で製造し、安定した製造技術を確立する必要がある。製造した空洞は順次 KEK にて性能評価される。

大量生産するにあたっては、現在手作業で行っている作業の自動化や製造技術の開発も必要となる。例えば、現在一つずつ行っているネッキング加工に関しても、同時に数ヶ所の加工を行うことで時間の短縮を図ることが可能である。パイプ製造技術及び液圧成形技術に関するこれらの開発を今後行ってゆくには、おおよそ 10 年程度かかる見通しで、費用としては 3.2 億円程度が見込まれる。また、このほかに電子ビーム溶接機のメンテナンス費、液圧成形装置の費用なども必要となる。

表 III-9-2 液圧成形による空洞製造に関連する事項の開発状況

パイプ製造元		1セル 450mm	3セル 800mm	9セル 1800mm
ATI Wah Chang	パイプ	○	○	○
	液圧成形	成功	成功	未
国内企業	パイプ	○	○	未
	液圧成形	成功	成功	未

表 III-9-3 今後必要とされる開発内容と期間及び費用

期間	1-3年	4-7年	8-10年
項目	9セル空洞の製造	歩留まりの向上	量産化
材料	9セル空洞用パイプの製造 (30,000千円)	10本以上の9セル用パイプ の製造（50,000千円）	
		パイプ製造コスト低減に 向けた開発 (50,000千円)	
製造	9セル空洞製造技術開発 (40,000千円)	空洞性能評価（50,000千円）	
		歩留まり向上（90%以上） 10台以上の9セル空洞を製 造（70,000千円）	製造自動化及び大量生産 技術の開発 (30,000千円)

- [III-9-1] C. Hauviller, Fully Hydroformed RF Cavities, Proc. PAC1989, 1989, pp. 485-487.
- [III-9-2] Joseph L. Kirchgessner, Forming and Welding of Niobium for Superconducting Cavities, Proc. The Third Workshop on RF Superconductivity, SRF87E05, 1987, pp. 533-544
- [III-9-3] C. Z. Antoine *et al.*, Hydroforming at Saclay: First issues, Proc. th Workshop on RF Superconductivity, 1997, <http://www.jacow.org/index.php?n=Main.Proceedings>.
- [III-9-4] C. Antoine, Materials and surface aspects in the development of SRF niobium cavities, EUCARD-CERN Monographs, 2012, 12 EuCARD-BOO-2012-001
- [III-9-5] W. Singer and X. Singer, Hydroforming of elliptical cavities, Phys. Rev. ST Accel. and Beams, 18-022001, 2015, pp. 1-22.
- [III-9-6] 藤野武夫, ニオブ・銅クラッドシームレス超伝導高周波加速空洞の研究, 総合研究大学院大学学位論文, 2003
- [III-9-7] 上野健治 他, 超伝速空洞のシームレス化に関する装置開発, 第 3 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TO18, 2006, pp. 138-140.
- [III-9-8] 上野健治 他, 超伝速空洞のシームレス化に関する装置開発 (第 2 報), 第 4 回日本加速器学会年会プロシーディングス, TO04, 2007, pp. 76-78.
- [III-9-9] E. Kako, *et al.*, Cryomodule tests of four Tesla-like cavities in the Superconducting RF test facility at KEK, Phys. Rev. ST Accel. Beams 13, 2010, 041002.
- [III-9-10] 山中将 他, シームレスニオブパイプを用いた液圧成形による超伝導加速空洞の製造, 第 12 回日本加速器学会年会プロシーディングス, THP056, 2015, pp. 1105-1108
- [III-9-11] 山中将 他, シームレスニオブパイプを用いた液圧成形による 3 セル超伝導加速空洞の製造と評価, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, MOP026, 2016, pp. 387-391
- [III-9-12] 永田智啓 他, アルバックの高純度ニオブ材を用いた超伝導加速空洞, 第 13 回日本加速器学会年会プロシーディングス, MOP014, 2016, pp. 345-347

10. 加速器土木のコスト削減

1) 掘削量削減によりコスト削減できる項目

加速器土木に対して行うコスト削減は、土木の項目では地下施設のための掘削量の削減と中央キャンパス・地上部建物の最適化設計が考えられる。また、電気設備のコスト削減は、加速器コンポーネントの効率上昇が、そして機械設備では冷却水温度・空調温度と制御温度範囲の最適化で実現される。その他の項目でのコスト削減は、必要最小限の機能を実現することで行われる。

これらの中でコスト削減効果の大きいと考えられる項目は掘削量の削減である。なんらかの研究開発を行って達成できる掘削量削減が可能な項目は以下のとおりである。また、それを可能とする技術開発を付随して挙げる。

- (1) 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更
入室管理方法と放射線シミュレーションによる最適化設計法の開発
- (2) ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更
ヘリウム冷凍機の最新技術を取り入れ、ヘリウムコンプレッサーとコールドボックスとの間の遠隔配置を可能とする開発
- (3) 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化
測定器組立技術の最適化を行う開発
- (4) 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化
トンネル配置を最適化するソフトウェアの開発

このうち、(1)～(3)については、TDR以降にLCCにおいて検討され、2015年のILC progress report^[III-10-1]に概略が記載されている。

2) 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更

もっとも掘削量が多いのは総延長 31 km にわたる主線形加速器トンネルである。TDR では、幅 11 m 高さ 5.5 m であり、中央の 3.5 m 厚のコンクリート製放射線シールド壁により加速器トンネルと電源トンネルに分けて使用する。二つのトンネルに分けるのは、加速器がビーム運転中においても作業者が電源トンネルにアクセスでき調整と保守が容易にできることを可能とし、どちらかのトンネル内で火災やヘリウム突出などの災害があった場合に、ほかのトンネルに容易に避難できることを保証する。

コスト削減のため、作業者のアクセスをさらに制限して、クライストロン運転時にはいままでどおり電源トンネルにアクセス可能とするが、ビーム運転中は加速器トンネルと電源トンネルの両方に入域できないという運転方法に変更すると、中央のシールド壁は超伝導加速空洞が発生する低エネルギーの X 線や中性子を遮蔽する機能を持てば良く、2 m ほど薄くできる。さらにトンネルの全幅も縮めることができる。したがって、加速器調整はクライストロン運転時に十分に行い、ビーム運転時にはトンネルを立ち入り禁止とし、すべてリモート制御のみで加速器調整、運転を行っていく必要がある。この中央シールド厚みを安全上信頼できるものにするために、あらたに導入された技術がクライオモジュール内の超伝導加速空洞内から発生する電界放出電子の挙動をシミュレーションするものである。このシミュレーションによりある電子は減速されるが別な電子は次々と加速され加速器チェンバーにあたって放射線を発生させる。その放射線がどれくらいの厚みのコンクリートシールド壁で十分に安全なレベルまで減衰できるかが推定される。いまのところ、加速器トンネルと電源トンネルの合計幅は、クライストロン機器の通過時のトンネル天井の屈曲面を考慮し、TDR 時より 0.5 m 拡張する。その結果、図 III-10-1 に示す

ように中央シールド壁は 1.5 m の厚さ、トンネル全幅は 9.5 m とできる見込みである。

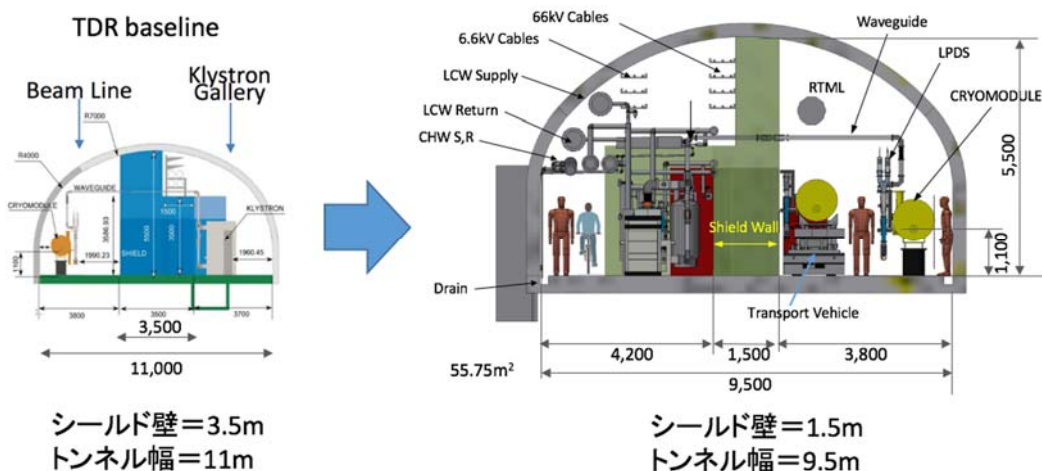


図 III-10-1 左側は TDR の主線形加速器トンネル断面図。右側の図は中央シールド壁の厚さを 3.5 m から 1.5 m に変更した後の主線形加速器断面図。全幅は電源トンネル側の機器通過を再検討したため TDR より 0.5 m 増加させている。

3) ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更

ヘリウム冷凍機はおおまかに分けてタンク部、コンプレッサー部、コールドボックス部であるが、そのうちコンプレッサー部は大きな機械振動が発生し大規模な冷却が必要である。この部分の機器配置変更を考えることは、コスト削減の面からだけでなく、以下の面からもメリットがある。

- ・機械振動が加速器運転に及ぼす影響を最小限にできる。
- ・安全上、大量のヘリウムガスや液体ヘリウムを地下カバーンに貯蔵しない。
- ・ヘリウム冷凍機は高圧ガス製造機器であり数時間ごとの定期巡回点検のしやすさ、保守のしやすさが必要である。
- ・停電の非常時に発生する蒸発ヘリウムガスを安全に貯蔵できること。

最新のヘリウム冷凍機製造技術によると、地下部には 2K コールドボックスと 4.5K コールドボックスのみを配置し、コンプレッサー部やタンク部を地上に配置し、それらの間は約 1 km のアクセストンネルを通してヘリウムガス配管で結ぶという機器再配置が可能である。その概念図を図 III-10-2 に示す。なお、蒸発ヘリウムガスは低温であるので断熱配管が必要である。また、コンプレッサーの冷却は地上部チラーと直結できる。

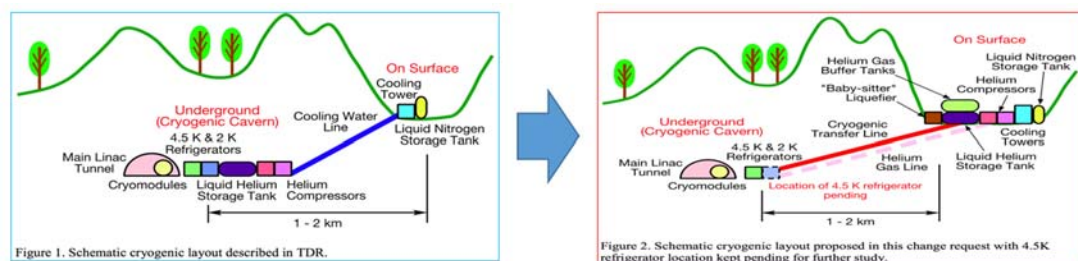


図 III-10-2 左側は TDR のヘリウム冷凍機装置の概念配置図。右側の図はコールドボックスのみを地下カバーンに配置しその他の冷凍機器を地上部に移したときの概念配置図。

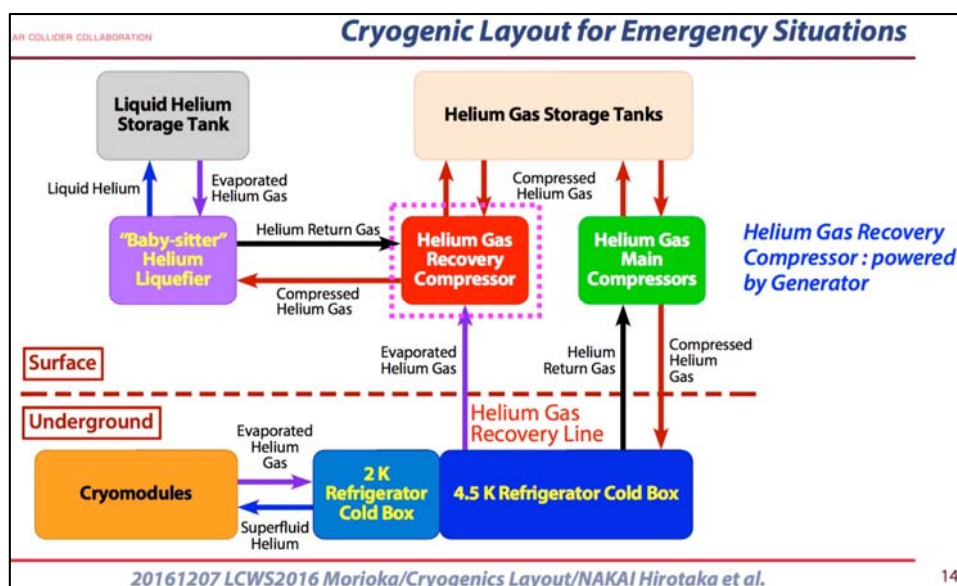


図 III-10-3 ヘリウム冷凍機配置の詳細図。2K, 4.5K コールドボックスを地下カバーンに配置（下側）し、コンプレッサーその他の冷凍機機器を地上部に移す。停電の非常時も考慮し、蒸発してくるヘリウムを液化貯蔵とガス貯蔵とで確保する。そのために非常電源で動作する小型の冷凍機が必要である。

図 III-10-3 には、ヘリウム冷凍機の各機器の詳細配置と接続の詳細概念図が示されている。貯蔵タンクを小さくして地上設備の大型化を避けるため、地下のコールドボックスのほかに地上部に小さな能力のベビーシッター液化器を持ち、非常時や保守時の蒸発してくるヘリウムガスを液化して貯蔵する案である。

TDR 時の地下カバーンのヘリウム冷凍機エリアは、2K, 4.5K コールドボックスのみとなるので、図 III-10-4 に示すように、20 m 幅で総延長 156 m の床面積のカバーンは、20 m 幅で総延長 13 m 程度に縮小可能と考えられる。ただし地上部の造成エリア拡大と建物が必要となる。

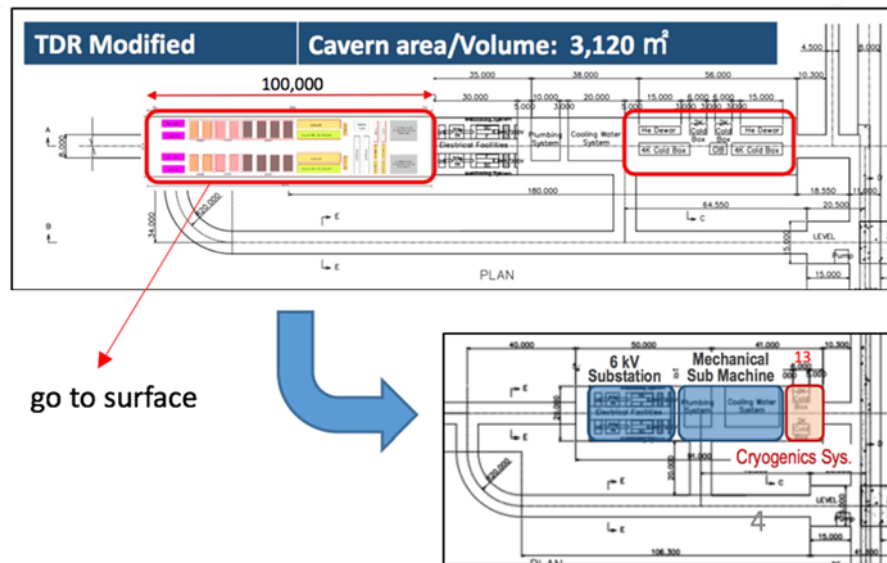


図 III-10-4 ヘリウム冷凍機コンプレッサーその他を地上部に移すときの地下カバンの変更図（下側）

4) 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化

ILC 候補地である山岳地深部の地下ホールに設置する測定器の組立方法にいろいろな最適化が検討され、その結果、最新の組立技術によって測定器ホール直上の組立棟内で大きな構造体を組立て、垂直シャフトを通じて、地下に下ろしてゆく方法が有力であることが判明した。もし、山間部に、地下トンネルからの土被りの小さな場所が見つかれば、測定器ホールまでの垂直シャフトによる測定器のアクセスが可能となる。

その時は、測定器の大構造部分の組立を地上部組立建屋内部で行い、組立建屋内部の直径 18 m の垂直シャフトにより測定器ホールへ下ろしてゆけるので、斜坑アクセストンネルは大型の測定器構成物が通過する必要がなくなり、加速器コンポーネント運搬用あるいは施設機器運搬用にその断面を小さくできる見込みである。

作業員、電気ケーブル、冷却水、空気などのアクセスは専用の直径 10 m のユーティリティシャフトで短い距離で地下と結ぶことも検討されている。図 III-10-5 に TDR からの変更の概念図を示す。左側図は TDR の測定器ホールの概念配置図で、右側図は垂直シャフトを採用し、小さな断面の斜坑アクセスを考えた時の概念配置図である。測定器の大部分の組立が地上となり、地下では最終組立のみとなるので測定器ホール自体を小さくできる。図 III-10-6 は変更後の地下施設の平面配置図、図 III-10-7 は 2 本の垂直シャフトの概念施工図を示す。この変更により、測定器ホールは、175,000 m³ の掘削量から 156,000 m³ へ削減となり、アクセストンネル断面は幅 11 m × 高さ 11 m が幅 8 m × 高さ 7.5 m へと変更になる。ただし、2 本の垂直シャフト掘削が必要となる。

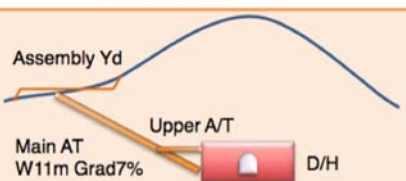
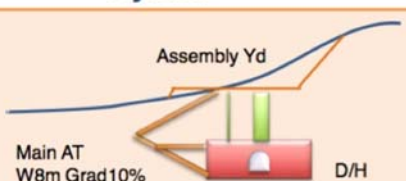
Baseline	Hybrid
	
• 1 HT (11x11m grad 7%) • Detector assembling is inside of DH	• 1 HT (8.0x7.5m grad 7%) • 2 VS (D18m, D10m) • Detectors assembling is on-ground.
• UT lines in DR/AT	• UT lines in UT shaft (N/A Main shaft)
• DH Excavated vol. 175,000m³ • L144m H42m W25m	• DH Excavated vol. 156,000m³ • L126m H42m W25m
• Detector parts are transported by Heavy weight transporter	• Detector is installed by Heavy lowering crane after assembled
• Location of DH and assembly yd. can be selected individually.	• Assembly hall is above D/H
• Human pass way : tunnel by vehicles • Machine and materials: tunnel by vehicles	• Human pass way :elevator in UT shaft • Machine and materials : Shaft and tunnel
• Environmental impact : smaller during construction.	• Need countermeasure for noise reduction of construction
• Emergency evacuation ways Main AT and DR AT.	• Emergency evacuation ways Main AT , DR AT , and shaft stair.

図 III-10-5 左側は TDR の測定器ホールの概念配置図。右側の図は垂直シャフトを採用し、小さな断面の斜坑アクセスを考えた時の概念配置図。測定器の組立方法が変更になるため測定器ホール自体も小さくできる。

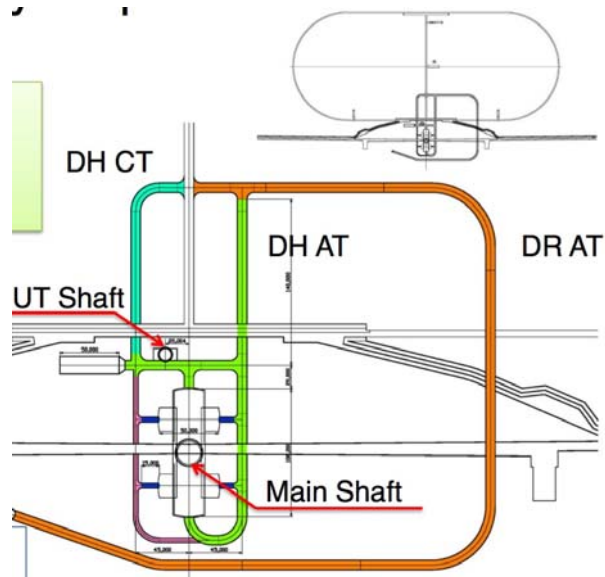


図 III-10-6 2本の垂直シャフトを採用し、小さな断面の斜坑アクセスを考えた時の概念配置平面図

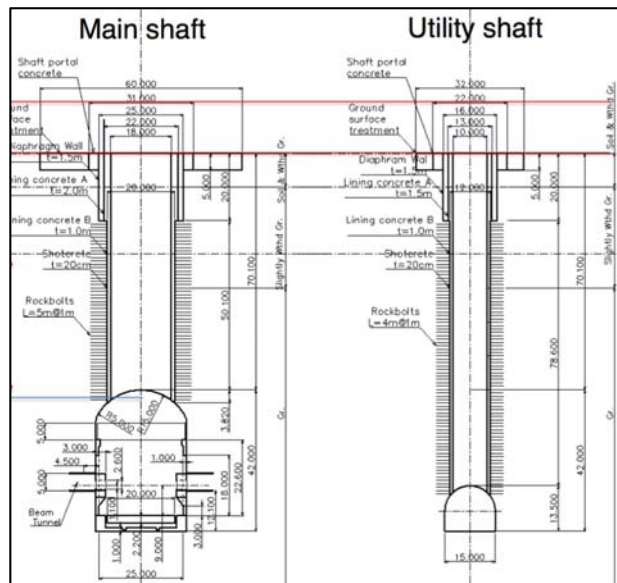


図 III-10-7 2本の垂直シャフト概念施工図。主シャフトは直径 18 m、ユーティリティシャフトは直径 10 m

5) 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化

トンネル配置最適化ツール (TOT: Tunnel Optimization Tool) が、CERN と KEK および ARUP 社との間で新技術としての共同開発が進められている。この TOT ソフトウェアには地質データと地形図データおよび加速器位置データが入力されており、それが最適化する項目は以下のとおりである。

- ・地形の中に加速器を最適化配置する。
- ・アクセス斜坑坑口 (アクセスポータル) の最適候補地を探し出し、アクセストンネルの長さを計算、最小化する。

加速器の配置の仕方では、図 III-10-8 に示すように、平面的な配置とその回転のほかに、ダンピングリングを西に配置するのか東なのか、電子線形加速器を北に配置するのか南なのか、の 4 通りの対称反転もチェックできる。それはアクセスカバーンが主線形加速器のダンピングリング側に配置されていることと、陽電子生成部のために陽電子線形加速器と電子線形加速器のアクセス位置が非対称な関係の設計になっているためである。地形図上の衝突点位置の配置は、(3) の項目の要請があるので、加速器全体が十分な土被りを確保できる標高とし、かつ測定器部分で垂直シャフトが最適なコストで掘削できる土被りの地点を選ぶ必要がある。

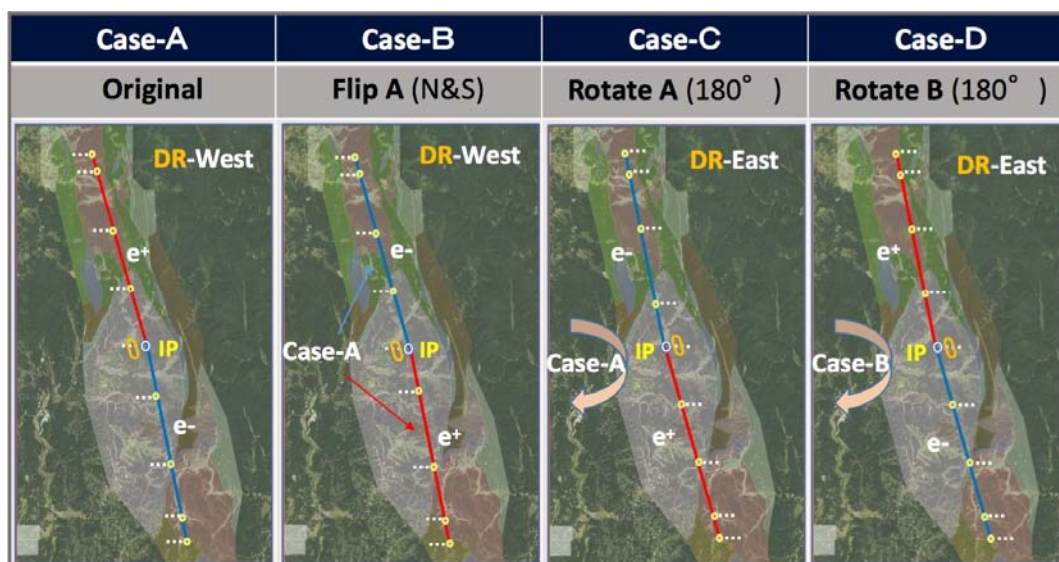


図 III-10-8 TOT ソフトウェアによる地形図上への加速器マッピングの例

各アクセスポータルを選定は、TOT ツールを使うことで最適化できる。指定するパラメータは以下のとおりである。

- ・アクセストンネルの長さの範囲
- ・アクセストンネルのスロープの範囲
- ・一般道路からポータルまでの距離範囲
- ・建物からポータルまでの距離範囲
- ・河川からポータルまでの距離範囲

図 III-10-9 の例に示す通り、上のパラメータを緩く設定すると最大 2.8 km² 内の円の領域でポータル候補を設定することができる。これらの中から条件範囲を限定してゆき、図 III-10-10 に示すように候補ポータルを限定してゆくことになる。最終的には、現地踏査ができる程度の数ヶ所まで絞り込み、現地踏査で環境を確かめてから最終候補地を絞り込むことになるであろう。実際の工事にとりかかる前に各種法規制順守の検討と環境アセスメント調査は必須であり、配置した加速器坑口および工事区域内の工事車両通行やズリ運搬、土捨て場などの環境において、希少植物保護や希少生物および希少猛禽類の保護、水質汚濁管理を精査し、環境影響を評価しなければならない。

TDR では、候補地に依存しない設計を行っているので、アクセストンネルの長さは一律 1 km、モデル地質を仮定してコスト算出を行なっている。ILC の建設サイトが限定された場合には、本 TOT ツールを使用することにより最小の時間で最短のアクセストンネル配置が可能となり、コスト削減に寄与できる。

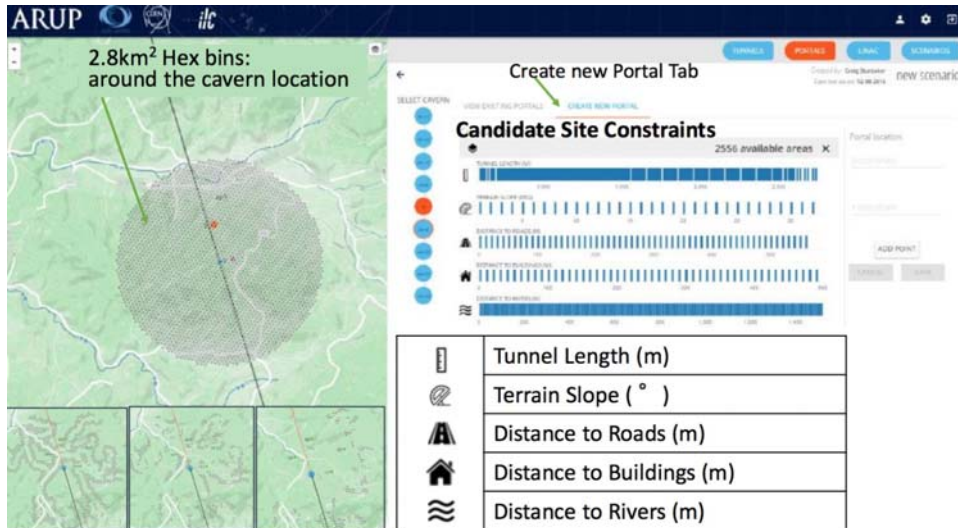


図 III-10-9 T0T ソフトウェアによる地形図上への斜坑坑口マッピングの例。五つの探索条件を設定できる。条件が緩い場合の候補坑口は、左図青点の地下カバーンにつながる地上部のアクセスポータル（坑口候補）は灰色の六角点群で示されている。（赤点は解析のため選択されているポータルを示している。）



図 III-10-10 T0T ソフトウェアによる地形図上への斜坑坑口マッピングの例。五つの探索条件を現実に即した設定にした場合のアクセスポータル（候補坑口）は、地上部の灰色の六角点群まで絞られる。

6) コスト削減の効果

これらの設計検討によって期待されるコスト削減効果は、

- (1) 主線形加速器トンネル内の中央シールド壁の厚さ変更によるコスト削減効果：
CFS-Civil（建築土木部分）の約-9%
- (2) ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更によるコスト削減効果：
CFS-Civil（建築土木部分）の約-0.3%
- (3) 測定器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化によるコスト削減効果：
CFS-Civil（建築土木部分）の約-0.5%

- (4) 候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化によるコスト削減効果：
CFS-Civil（建築土木部分）の約-1.2%

である。

CFS 部分にかかるコスト削減は、新規の技術開発と机上検討により検討される。新規技術はほとんどが最近に開発されたものであるので、机上検討は設計変更による概念設計図面の変更と精密なコスト算出を行うものである。その机上検討に要する期間は、項目ごとに 2 ヶ月程度かかると見込まれる。並行して進めれば 4 項目で 2 ヶ月であるが、シリーズに行えば 8 ヶ月要するものである。

検討に要する経費は、

各項目の図面変更、コスト算出、報告書作成： 500 万円×4 項目＝2,000 万円
と見込まれる。

参考文献

- [III-10-1] Linear Collider Collaboration, "The International Linear Collider Progress Report 2015", July, 2015.
<https://cds.cern.ch/record/2059240/files/CERN-ACC-2015-0131.pdf>

1.1. 測定器のコスト削減

1) リターンヨークの鉄の量の削減に関する研究開発

(1) 概要

リターンヨークの鉄の量を削減するための研究開発は、計算機シミュレーションによる設計の最適化が主体となる。もう一つの測定器の場所での漏れ磁場を低い値に保ちつつ、リターンヨークの鉄の量を削減するためのいくつかの案について、有限要素法を用いた 3 次元磁場計算を行う。リターンヨークは放射線遮蔽の役割を兼ねているため、有望と思われるデザインに関して、さらに放射線遮蔽に関するシミュレーションを行う。漏れ磁場、放射線遮蔽共に要求基準を満たしたデザインに関しては、その実現可能性、とりわけ巨大な磁気遮蔽壁の耐震性まで含めた現実的な設計に関して、過去に同様の鉄構造体を製作した実績のあるメーカーに検討を依頼する。また、鉄を削減すると遮蔽壁の励磁された測定器側では漏れ磁場は強くなる。測定器の近傍には超伝導コイルのための冷凍機関連の機器や測定器のための低電圧電源等の機器が設置される。これらの機器の中には強磁場中では動作しなくなるものもあるかもしれない。そのような事態を避けるため、機器のための磁気遮蔽の方法を検討するとともに、機器の磁場耐性の試験を行い、必要であれば耐性強化のための研究開発を行う。

(2) 世界的な動向と最新の状況

これまでに、DESY の研究者が ILD のリターンヨークに関して単純なモデルを仮定して 3 次元磁場計算を行い、ILD と SiD の間に分厚い鉄の磁気シールドのための壁を設置することで、トータルの鉄の量をかなり削減できることが明らかとなった。リターンヨークの鉄の量を減らし (TDR でのベースラインデザインの厚さ 3.2 m を 2.04 m に)、厚さ 0.5 m、高さ 12 m、幅 25 m の鉄の壁を測定器の中心から 13 m の位置に設置した場合の磁場分布を図 III-11-1 および図 III-11-2 に示す。X>15 m の領域で漏れ磁場は 10 ガウス程度になっていて、50 ガウス以下という要求を満たしていることがわかる。

これらの予備的な計算結果から、二つの測定器の間に鉄の遮蔽壁を置く案がコスト削減にとって大変有望であることがわかる。今後の研究開発はこの案を中心にして、さらに詳細なモデルに基づいた磁場計算や放射線シミュレーション、実現可能性の検討へ進むと思われる。

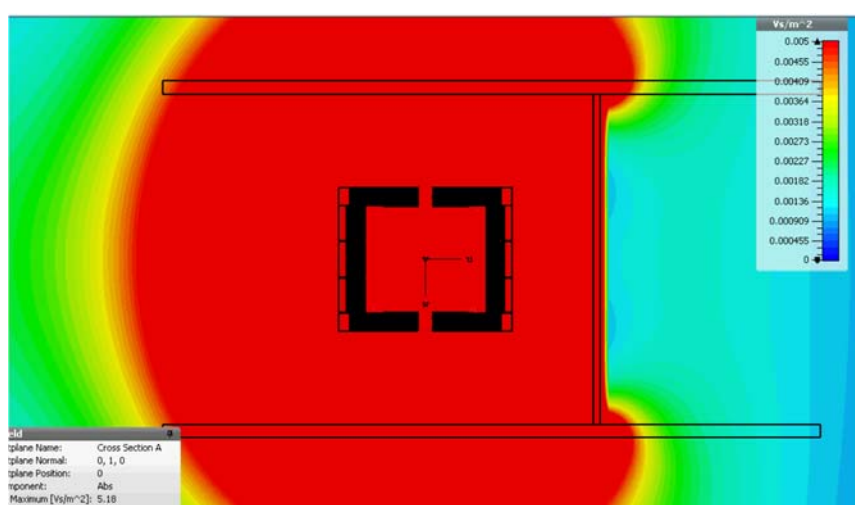


図 III-11-1 リターンヨークの鉄の量を減らし、鉄の壁を測定器の中心から 13 m の位置に設置した場合の磁場分布。スケールの単位はテスラ (T)。0.005 T (50 ガウス) 以上の領域はすべて赤で表されている。

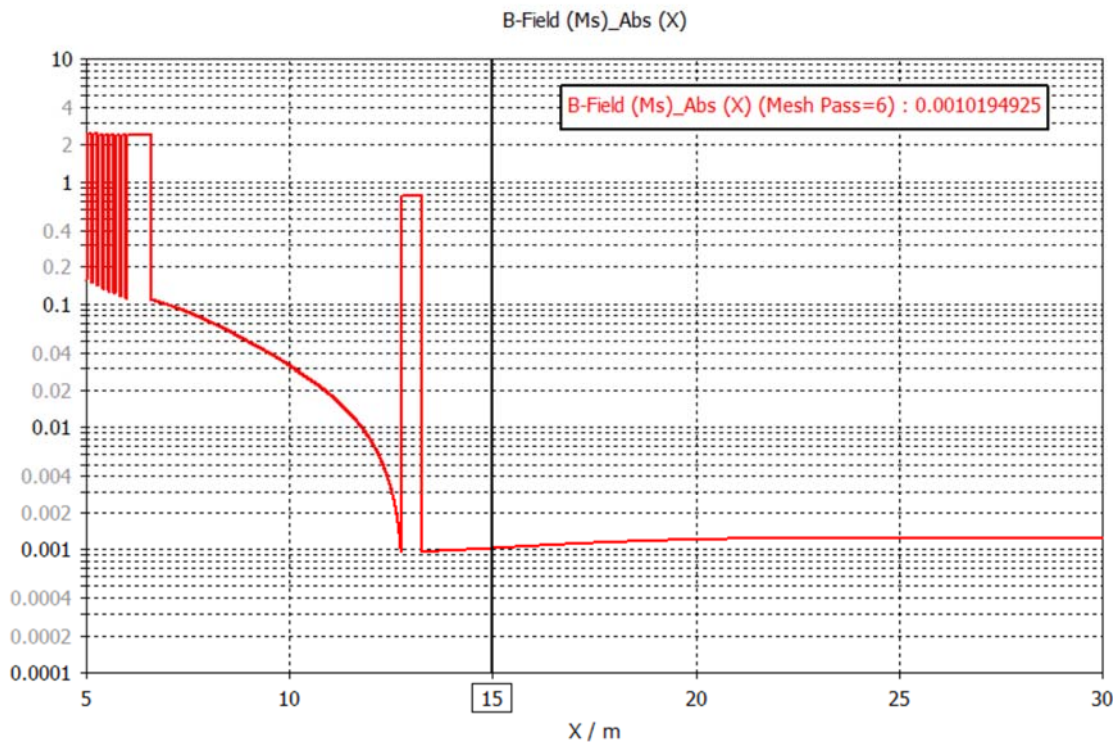


図 III-11-2 リターンヨークの鉄の量を減らし、鉄の壁を測定器の中心から 13 m の位置に設置した場合のビーム軸からの距離の関数としての磁場分布

(3) コスト削減研究開発の状況

TDR で用いられたリターンヨーク用の鉄の単価と、予備的な磁場計算で用いられたモデルでの鉄の削減量から計算を行いつつある段階である。鉄の量を削減することで測定器が若干小型化される結果、地下実験室のサイズや、地上で組み立てる際に必要なクレーン容量も小さくなるなどの副次的なコスト削減の可能性もある。

研究開発としては、より詳細で現実に即したモデルに関する 3 次元磁場計算、放射線遮蔽シミュレーション、磁気シールド壁の検討・設計などが必要であると見込まれる。研究開発に要する費用と、コスト削減の効果については、さらに検討を進めたうえで見極める必要がある。

2) 新しい超伝導線材の開発

(1) 概要

ILC 測定器に用いられる超伝導ソレノイド用の導体として、図 III-11-3 の左から 2 番目と 3 番目のような断面を持つ導体が提案された(図は ILD 測定器用のサイズ (74.3×22.8 mm²) の物を示しているが、SiD 測定器も同様の構成)。左から 2 番目は LHC の CMS (左端) で採用された導体の構成と同じで、Cu マトリックス NbTi ケーブルの周囲を高純度アルミで囲み、さらに電子ビームでアルミ合金を溶接して機械強度を増している。左から 3 番目は LHC の ATLAS-CS (Central Solenoid) で採用された導体と同様の構成で、純アルミに Ni を添加して機械強度を増しながら低抵抗を維持した素材 (Al-Ni) で Cu マトリックス NbTi ケーブルを囲んでいる。TDR ではすでに実績のある CMS タイプの導体がベースライン

として採用されたが、Al-Ni 安定化材を用いた導体はオプションの一つである。さらに挑戦的なオプションとして、図の右端に示すような、Cu マトリックス NbTi 自身の Cu 比を増すことで安定化材の機能を確保し、ケーブルの周囲はアルミ合金で囲むことでより強度の高い線材（アルミ合金クラッド線）を得るという構造が提案されている。電子ビーム溶接や Ni 添加純アルミのようなコストを上げる要素を省くことで一定のコスト削減が期待できる。

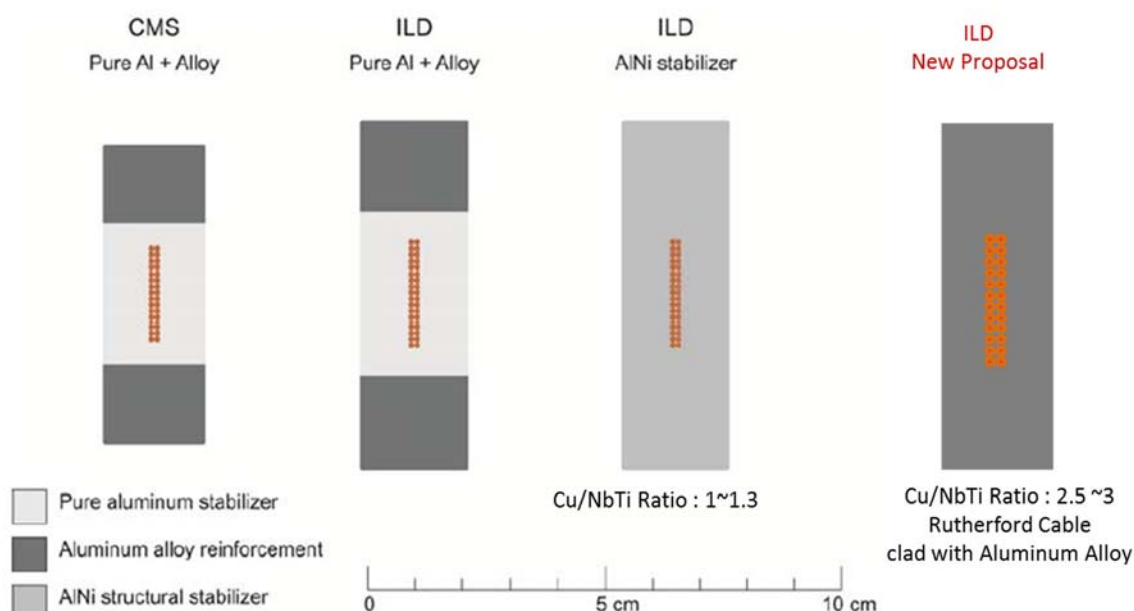


図 III-11-3 ILD 測定器用超伝導線材の候補の断面図

「Pure Al + Alloy」、「Al-Ni Stabilizer」、および「大 Cu 比 + Alloy」の製造プロセスを図 III-11-4 にまとめる。「Pure Al + Alloy」に比べ、「Al-Ni Stabilizer」は工程が減っており、「大 Cu 比 + Alloy」ではさらにもう一段の工程削減が実現でき、それによるコスト削減が期待される。ただし、全体強度を上げたアルミ安定化導体の押し出し製造については、引き続き製造設備などを含めた幅広い検討が必要と考えられる。Cu 比 3 の NbTi 素線はごく一般に流通しており、製造のネックにはならない。最も大きなコスト削減が期待される「大 Cu 比 + Alloy」の研究開発の概要を以下に述べる。

シミュレーションによるクエンチ耐性の評価

励磁中のコイルの超伝導状態が破れる、いわゆるクエンチを起こした場合の導体の電氣的、熱的、機械的な挙動をシミュレーションで確認する。

アルミ合金の選定

アルミ安定化超伝導線の実績のあるメーカーとの協議では、クラッドするアルミ合金として 3,000 台 (Al-Mn) 5,000 台 (Al-Mg) が推奨されている。Cu マトリックスとアルミ合金の同時押し出しによるクラッド加工に適したアルミ合金を、試作を通じて調査する。

高強度導体の機械特性測定

アルミ合金クラッド線は、引っ張り強さとしては 150-200 MPa 程度になると考えられる。ILD のような大断面で高強度の導体のコイル巻き線は、単純にテンションを掛けて巻き枠に巻き付けるだけでは不可能で、適度に線材に曲げ加工を施しながら巻き線をしなければならぬ。試作した導体を対象に、曲げ加工時の機械特性を測定し、精度の良い曲率での曲げ加工ができる巻線機を開発する。

導体接続

純アルミクラッドの超伝導線の場合、抵抗値が $1 \times 10^{-12} \Omega$ とかなり低いので、クラッド越しの接続でも十分抵抗の低い接続ができていた。アルミ合金クラッド線での接続は、抵抗が高くなるので、内部の Cu/NbTi ケーブルを露出させてからの接続となる。試作した導体を対象に、接続手順の確立と抵抗値の確認を行う。

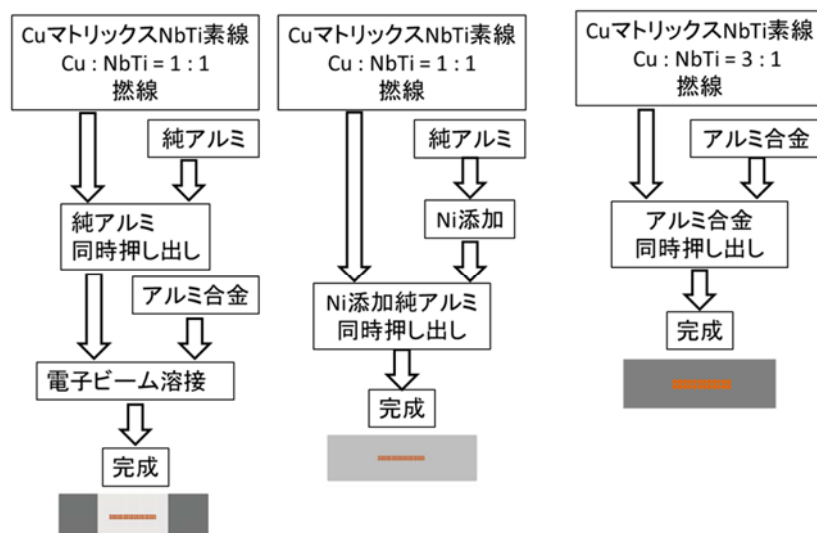


図 III-11-4 各線材案の製造プロセス比較

(2) 世界的な動向と最新の状況

「Al-Ni Stabilizer」のオプションは LHC のアトラス実験で小断面の物が採用された。CERN においてはその後大断面化に向けた研究開発が進められ、 $57 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ の断面を持った試作品が製作され、基本的な性能評価が行われた。

「大 Cu 比+Alloy」のオプションは KEK の研究者によって提案がなされている段階で、実際の研究開発は未着手である。

(3) コスト削減研究開発の状況

「Al-Ni Stabilizer」と「大 Cu 比+Alloy」のどちらのオプションでも電子ビーム溶接の工程がなくなる。また、「Al-Ni Stabilizer」の方はいったん 99.999%以上の純アルミを精製して Ni 添加するのに対し、「大 Cu 比+Alloy」の方は 99.9%の純アルミから合金化をするので、原材料費のコスト削減の可能性もある。研究開発の期間としては、シミュレーションによる研究、アルミ合金の選定、導体の試作、曲げ加工試験、導体接続の研究開発などを合わせて、合計 3 年を要すると見込まれている。研究開発に要する費用と、コスト削減の効果については、さらに検討を進めたうえで見極める必要がある。

IV. 超伝導以外の加速方法

1. 常伝導コライダー

1) CLIC

システムとしての全体設計のある常伝導コライダーはコンパクト・リニアコライダー (CLIC: Compact Linear Collider)に限られるので以下はこれについて説明する。

CLIC は 1988 年頃から CERN のリーダーシップのもとに研究開発がすすめられ、現在は LCC のフレームワークのもとに、ILC と並行して研究が進められている。公式の文書としては、概念設計書 (CDR: Conceptual Design Report)が 2012 年に公表され^[IV-1-1]、最近ではステージングを考慮した修正が発表されている^[IV-1-2]。

2) CLIC の原理

CLIC は研究開始当初から ILC より高いエネルギー (3 TeV) を目標としており、したがって、要求される技術も高度で、その完成までには今後の研究開発が必須である。この点で ILC との単純な比較はむずかしい。

主線形加速器は通常のクライストロンを使う常伝導リナックとは異なる、「2 ビーム方式」を採用している。これは、まず低エネルギー (2.4 GeV)・低周波 (1 GHz)・大電流 (約 4 A)・長パルス (148 μ s) の駆動リナックで電子を加速し、delay loop および combiner ring と呼ばれる装置でバンチ間隔を詰める (この結果電流は約 100 A になる)。この電子ビームをいくつか (3 TeV の場合 25) に分割し、PETS (Power Extraction and Transfer Structure)と呼ばれる減速空洞に通して 12 GHz の高周波マイクロ波を発生させ、これを PETS に並行して走る高エネルギー電子・陽電子線形加速器に供給する(図 IV-1-1)。これは、通常の線形加速器なら数万台必要となるクライストロンを、1 本の巨大なクライストロンに置き換えたものということができる。

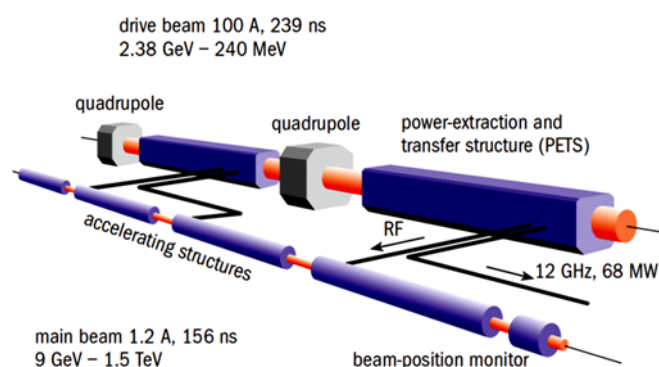


図 IV-1-1 CLIC の原理。駆動リナック (図には描いてない) で加速した電子ビームを右上側の PETS に通して 12GHz のマイクロ波を作り、これを左下側の加速器に通す。

CLIC の利点としては、超伝導に比べて高い加速勾配（72-100 MV/ m）が可能で 50 km のサイトで 3 TeV に到達できること、重心系エネルギーを上げるには、駆動リナックのパルス長を伸ばせばよいこと、などが挙げられる。

3) CLIC のレイアウトとパラメータ

図 IV-1-2 に 3 TeV 用の CLIC の模式図を示す。上部左右にある灰色部分が駆動線形加速器、delay loop および CR1/CR2 がバンチ間隔圧縮装置、藍色の四角が PETS である。1.5 TeV 以下では駆動リナックの一方は不要である。図の下部はコライダー部分で、電子は一つ、陽電子は二つの減衰リングを使う。

表 IV-1-1 に CLIC の主なパラメータを示す。

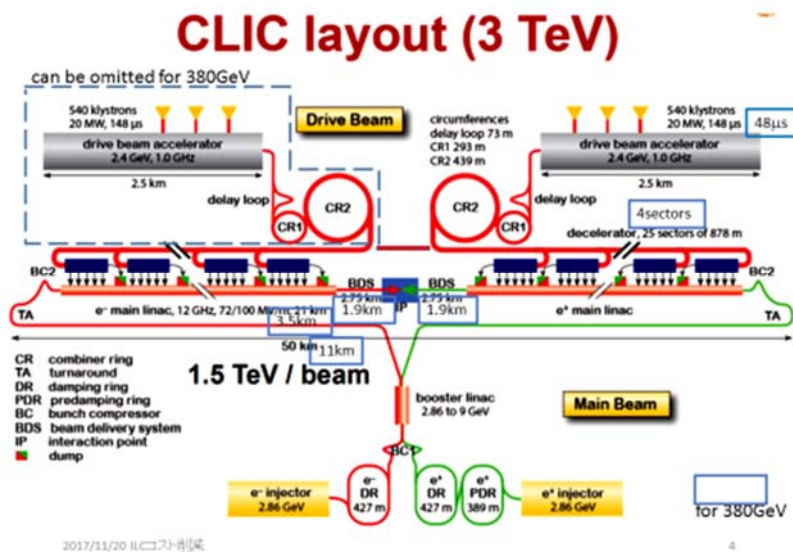


図 IV-1-2 3 TeV CLIC の模式図。青枠で囲われた部分は低エネルギーの場合省略あるいは縮小される。青枠内の数値は 380 GeV の場合。

表 IV-1-1 CLIC の最新パラメータ。Rebaseline Document に基づく。三つのエネルギーステージの場合を示す。

Rebaseline Document Aug.2016 (1608.07537.pdf)					
			Stage 1	Stage 2	Stage 3
Center-of-mass energy	GeV		380	1500	3000
Repetition frequency	f_{rep} Hz		50	50	50
Number of bunches per train	n_b		352	312	312
Bunch separation	Δt		0.5	0.5	0.5
Pulse length	τ_{RF}		244	244	244
Accelerating gradient	G		72	72/100	72/100
Total luminosity	L	$10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$	1.5	3.7	5.9
Luminosity above 99% of sqrt(s)	$L_{0.99}$	$10^{34}/\text{cm}^2\text{s}$	0.9	1.4	2
Main linac length	km		11.4	29.0	50.1
Number of particles per bunch	N	10^9	5.2	3.7	3.7
Bunch length	σ_z	μm	70	44	44
IP beamsizes	σ_x/σ_y	nm	149/2.9	~60/1.5	~40/1.0
Normalized emittance (linac end)	ϵ_x/ϵ_y	nm	920/20	660/20	660/20
Normalized emittance at IP	ϵ_x/ϵ_y	nm	950/30	-	-
Estimated power consumption	P_{wall}	MW	252	364	589

2017/11/20 ILCコスト削減

5

4) 超伝導コライダーとの違い

高勾配が達成しやすいという点以外に、超伝導コライダーとは以下のような点で異なる。

- ・ 加速空洞の Q 値が超伝導に比べて約 6 桁小さいため、パルス長がはるかに短くなる (μs vs. ms)。このため、ビームのパルス内フィードバックおよび測定器の設計がむずかしくなる。
- ・ 周波数が高い (12 GHz vs. 1.3 GHz) ため、加速空洞が細く、したがって wakefield 効果が大きい。wake force は、

$$(\text{バンチ電荷 } N) \times (\text{バンチ長 } \sigma_z) \times (\text{設置誤差}) / \lambda_{RF}^{3.5}$$

程度に比例する (λ_{RF} は高周波の波長)。このため、バンチ電荷 N を小さくせざるをえない。

- ・ ルミノシティは、 $\eta \times P_{AC} \times N / (\text{beam area})$ に比例する (P_{AC} は消費電力、 η は AC からビームへの電力変換効率、したがって $\eta \times P_{AC}$ がビーム電力)。 η は超伝導にくらべて約半分であり、かつバンチ電荷 N が小さいため、その分を小さい beam area で補う。このため、ビーム制御により高い技術が要求される。

5) CLIC のコスト

駆動リナックの初期投資は大きいですが、エネルギー増強に際しては、主線形加速器の加速空洞を増加するほかには、駆動リナックのパルス長を伸ばすだけですむ。したがって、エネルギーの関数としてのコストは模式的に図 IV-1-3 のようになる。コストの交差するエネルギーは、ILC-TDR, CLIC-CDR の値をそのまま用いると、500 GeV 前後と考えられる。ただし、それぞれが、かなりの不定性をもつ。

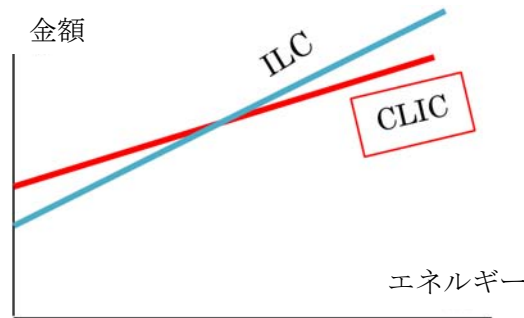


図 IV-1-3 エネルギーの関数としてのコストの比較。駆動リナックの初期投資のため CLIC は低エネルギーでは高いが、勾配は小さい

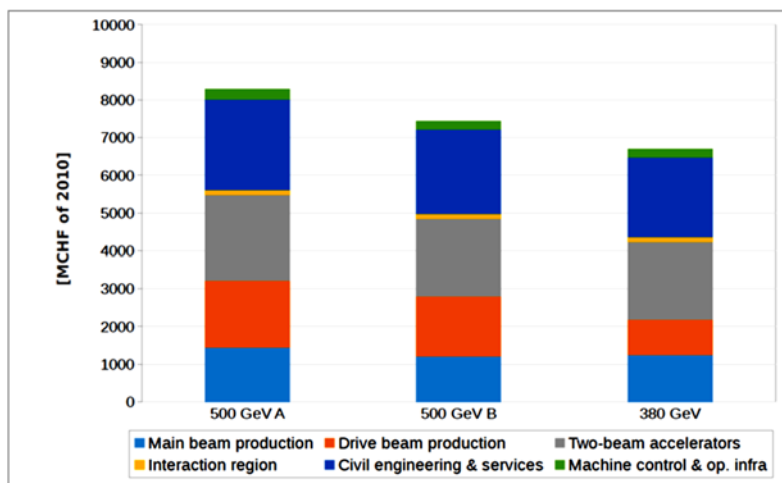


図 IV-1-4 低エネルギーCLICのコスト

500 GeV および 380 GeV の CLIC のコストを図 IV-1-4 に示す (LCWS 2017 での P. Burrows 氏の講演による)。単位は 2010 年現在の MCHF (Million Swiss Franc)であり、当時 $1\text{US\$}=0.96\text{CHF}$ であった。500 GeV は 2 種類のコストが挙げられているが、A は 500 GeV でルミノシティを最適化した場合、B は 3 TeV の設計をそのまま使った場合である。前者のほうが高い。380 GeV は Rebaseline による。いずれも 2 ビーム方式による。ILC との比較は単純ではないが (たとえば CLIC は CERN のサイトを仮定している)、既存 CERN メインキャンパス及び共通支援施設分 (< 数%) が含まれない、大きな差はない。TDR による 500 GeV の ILC コストは CLIC 500 GeV の A と B の中間である。

6) CLIC の消費電力

通常の線形加速器での電力の変換は交流 (AC) 電力→クライストロン→空洞→ビームであり、全変換効率はそのそれぞれの段階の効率をかけなければならない。2 ビーム方式では、

AC 電力→駆動線形加速器クライストロン→駆動線形加速器空洞→駆動線形加速器ビーム→PETS→空洞→ビーム

という複雑な過程からなる。PETS まだが通常のクライストロンに相当する。このため、駆動リナック + PETS の電力効率が極めて重要である。最終的には、AC→ビームの電力効率は ILC の約半分であ

る。各部で電力節約を研究中である（たとえば永久磁石の広範な使用など）。表 IV-1-2 に ILC と CLIC の消費電力の比較を掲げる。

表 IV-1-2 ILC と CLIC の消費電力の比較

option	ILC			CLIC			
			B		A	B	
ECM (GeV)	250	500	1000	380	500	500	3000
repetition frequency	5	5	4	50	50	50	50
number of bunches	1312	1312	2625	352	312	312	312
Luminosity	1.35	1.8	4.9	1.5	1.4	0.7	5.9
Total Power (MW)	~125	164	300	252	272	235	589

7) CLIC 技術の完成度

CLIC 技術の開発には、加速部分については CERN の試験施設である CTF3、ビーム収束については KEK の ATF2 などを用いて研究が行われてきた。すぐに CLIC を建設することができないのは、技術的な完成度のためである。主要な部分は以下のようなものである。

(a) Drive beam の発生試験

前記のように高い電力効率が要求されるために、ビームローディングは必然的に高くなる。RF からビームへの 100%に近い電力効率の原理試験は成功しているが、位相・電流などの安定性、長パルス試験はまだ十分でない。

(b) PETS での減速試験

CDR の設計では、十分な減速、少なくとも 90%までエネルギーを吐き出さなければならない。今のところ、実際に行われているのは 30%台である。ここが最も難しいところと考えられる。

(c) 加速勾配

加速勾配については、100 MV/m をほぼ確立していると言える。しかし、12 GHz の空洞では HOM（ビームが発生する電磁場のうち、余計な周波数の成分）の減衰が必須であり、HOM 減衰構造を持つ加速空洞については、まだ十分とは言えない。さらに量産の問題もある。

(d) 線形加速器でのエミッタンス保存

前述の wakefield 問題のため、線形加速器でのビーム制御はむずかしい問題である。最初に設置するときには 10 μm の精度が必要である（ILC の場合は 200-300 μm ）。このための試験は行われたが大規模にできるかどうかは課題である。また運転中にはアクティブフィードバックが必要である。すなわち、常に地盤変動をモニターし、ピエゾ素子をつかって 4 極磁石の位置を動かす。これも試験は行われているが大規模にできるかどうかは課題である。

(e) Final Focus System

3 TeV では最終的には鉛直方向約 1 nm まで絞る。これは ATF2 で研究されているが、まだ最終的な目標にまでは至っていない。

これらをすべて達成するにはさらなる研究開発が必要である。最新のタイムラインでは、2025 年まで研究開発を行う計画になっている^[IV-1-3]。

8) クライストロンコライダー

CLIC 技術の完成までには時間がかかるので、最初の低エネルギーのステージは 2 ビームでなくクライストロンを使うという案も出ている。あるいは、低エネルギーならクライストロンの方がずっと安いのではないか、という期待もある。2 ビーム方式は、コライダー以外にはほとんど応用がないが、クライストロンは、いろいろなところで使うことができる。これも高効率のクライストロンを開発する動機になる。

もしクライストロンを使うなら、前節の課題のうち (a) 高効率の駆動リナックと (b) PETS は要らなくなる。(c) 加速勾配 (d) エミッタンス保存 (e) Final Focus System は残るが、2 ビーム方式よりは早期に実現できると考えられる。

コストは、2 ビーム方式との両立性によってやや異なる。 $E_{CM}=380$ GeV の場合、2 ビーム方式でエネルギー増強可能なクライストロンコライダーのコストは、はじめから 2 ビームにした場合とほぼ同じで、大幅なコスト削減はない。5%程度までのコスト削減は可能かもしれない。

クライストロン方式で始めて、エネルギー増強のいずれかの時点で 2 ビーム方式に移る場合、その時に駆動リナックを造ることになるので、コストの曲線は図 IV-1-3 とは違って途中で段差ができる。クライストロン方式加速空洞は（最適ではないが）使える。

CERN で検討したクライストロンコライダーは将来 2 ビーム方式にアップグレードすることを念頭においたものであるが、将来にわたってクライストロン方式をとる場合も、X バンドの常伝導を考えるかぎり大差ないであろう。より低周波（たとえば C バンド）のクライストロンコライダーに関しては、15 年以上前に KEK で検討したことがあるが、それ以後の進歩を含めたコライダーとしての設計はない。

参考文献

[IV-1-1] <http://project-clic-cdr.web.cern.ch/project-CLIC-CDR>

[IV-1-2] Rebaseline document, <https://arxiv.org/abs/1608.07537>

[IV-1-3] Philip Burrows, "CLIC Accelerator Status and Optimisation", LCWS2017, https://agenda.linearcollider.org/event/7645/contributions/39681/attachments/32179/48789/LCWS_Oct2017.pdf

2. プラズマ加速

1) プラズマ加速の原理

プラズマとは、気体の電子と原子核が分離した状態である。プラズマの固有振動に一致したパルス幅の電子ビームあるいはレーザービームを通すと、電子が共鳴的に動かされてプラズマ波（電子の濃淡）が発生し、プラズマ内に強い電場が発生する。この電場により、外から投入した電子あるいは陽電子を加速することができる（図 IV-2-1）。

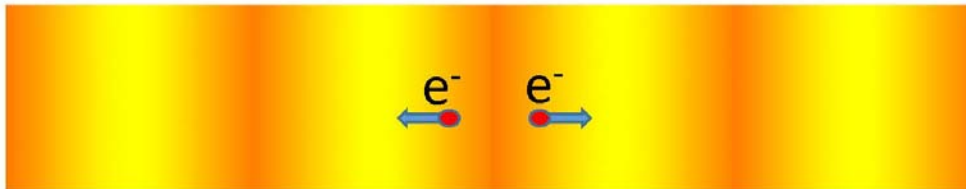


図 IV-2-1 プラズマ加速の原理

電子ビームによってプラズマ波を発生するものを PWFA（Plasma Wakefield Accelerator）、レーザーで駆動するものを LWFA（Laser Wakefield Accelerator）と呼ぶ。

通常のマイクロ波加速の場合、マイクロ波の位相速度を加速されるべき電子の速度（ほとんど光速）に合わせるために、金属などにより境界条件をつくらなければならない。この場合、電磁場エネルギーを上げてゆくと、高い電場によって金属境界が破壊される現象が起き、これが加速電場の限界を決めている。プラズマはもともと固体ではないので破壊されることがない。このため、マイクロ波加速の 100 倍もの加速勾配が可能になる。

2) プラズマ加速の原理により ILC 相当の加速器を作る場合の課題

数 GeV 程度の単段加速について、ビーム電流強度を約 10 万倍にする必要がある。また、多段加速について実証する必要があるが、現在のところ 2 段の実証実験が存在するのみである。加速の際にビームの取りこぼしがあると放射線をばら撒くため、99.99%のビーム加速効率が必要である。これについて、DOE のレポートでは、10 年後の達成目標を 90%としている。（ILC 相当の加速器を実現するためには、その後、90%をさらに 99.99%にする必要がある。）

また、陽電子を加速するアイデアはいくつかあるものの、原理実証を行っている段階である。衝突型加速器に使用できるような加速実験の成果は現段階ではない。このため、いつまでにできるとは言えない。

コスト及び電量効率についてもまだ課題が残っている。少なくとも、レーザー発生器について、約 10 万分の 1 のコスト削減が必要である。電力効率について、約 5 万倍の改善が必要である。

以下では、これらの課題の詳細について述べる。

（1）ビームの性質について

リニアコライダーに使うためには、ビーム強度・エネルギー幅・エミッタンスなどの、さまざまな条件を満たさなければならない。ビーム強度について、これまでの達成値（単段加速）は、以下のようになっている。

- * 1 バンチの電荷量 10 pC ~ 100 pC （必要量の 1/100 から 1/10）
- * 繰返し 1 Hz 程度 （必要値の 1/10,000）

エネルギー幅については、最終収束系で微小ビームに収束するために、0.1-0.2%以内が要求されるが、現状は1%程度までであり、さらに後述のような大きなビームローディングのもとではこれよりずっと大きい。エミッタンスについては、とくに水平方向エミッタンスに対して、ILCより2桁近く小さい値が要求される。

各種のパラメータは、同時に達成しなければならないが、現在のところそれは不可能なので、各項目独立のチャンピオンデータしかない。

加速装置1段では、LWFAでもPWFAでもわずかな加速しかできないので、多数の加速装置を連結して、多数の駆動ビームを使わなければならない。必要な段数は、1台のレーザー電力・プラズマ密度など多くのパラメータによるが、1 TeVに達するには数十段から数百段が必要である。多段加速は、入口・出口での光学の整合、タイミング合わせが難関である。入口ではプラズマ密度がゼロからなめらかに上昇、出口ではこの逆にしなければならない。タイミングは、駆動ビーム・被加速ビーム間のタイミング許容値と同じ0.1 fs程度が必要である。

レーザーによる多段加速の最初の試験は、5 GeV+5 GeVをめざして、2010年ごろに始まった（ローレンス・バークレー国立研究所（LBNL）のBELLA）。結果は、Nature 530 (Feb.11 2016), p190にあるが、2段加速で100 MeV余に到達し、2段目の加速に成功した電子は数%であった。

ILC相当の加速器にするには、加速途中での「こぼれ」はほとんど許されない（広く放射線を放出するため）、99.99%以上でなければならない。DOE reportには今後10年の目標として90%という数字があがっているが、これは最終目標としては全く不足している。

（2）陽電子の加速について

陽電子の加速には多数の問題があり、いまだに方向性がない。代表的な加速方法として、以下の三つの型（regime）が挙げられる。

*Quasi-linear regime (10^{18} W/cm² 程度)

陽電子の加速もできるが、プラズマ密度が加速されるビームの密度よりも非常に小さいため、エネルギー効率を上げられない。プラズマの収束力から来る設置位置許容誤差は厳しい（電子も同じ）。

*Blowout regime (10^{19} W/cm² 以上)

陽電子を加速できない（陽電子の加速位相では、陽電子を収束させる領域はほとんどない）。

*Hollow plasma （陽電子による陽電子の航跡場加速）

ビーム軸上にプラズマがない状態（中空プラズマ）で加速を行う。収束力がないので設置位置許容誤差緩くなるが、同じ理由で不安定性が厳しい（不安定性を抑えこめない）。

いずれにしても、陽電子加速のシナリオはできていないと言える。以下に、参考として Quasi-linear regime と Blowout regime について、プラズマ密度、電場分布、加速領域を比較した図 IV-2-2 を示す。右の図が Quasi-linear regime で、左の図が Blow-out regime を示している。上から、プラズマ密度、加速方向電場、垂直方向電場の分布を示している。二つの赤縦線の間が、電子を加速できる領域である。また、二つの白縦線の間が、陽電子を加速できる領域である。Blow-out regime では、陽電子を加速できる領域が非常に狭いことが分かる。

- The gradient can be higher in the blowout regime but

- difficult to accelerate positron
- very narrow region of acceleration and focusing

Figure from ICFA Beamdynamics News Letter 56

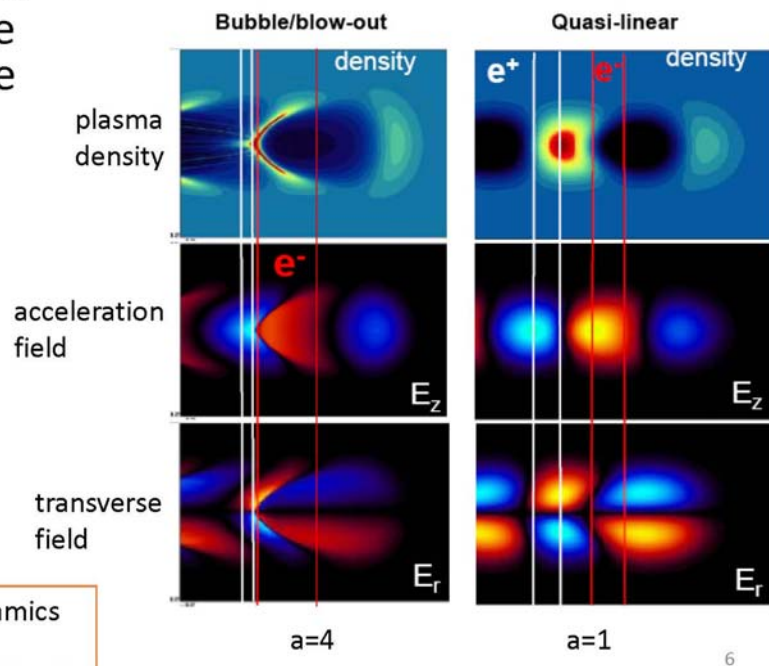


図 IV-2-2 Linear Regime と Blow-out Regime の比較（出典：文献 IV-2-1）

（３）コスト・電力効率について

プラズマ加速の採用により明らかにコスト削減が図れるのはトンネル掘削のみである。主線形加速器部分（全体コストの約 6 割）がどの程度安価に（あるいは高価に）なるか不明である。現在利用できるレーザー(1 Hz, PW, 30 fs)で 500 GeV の加速器を作ると、レーザーのコストだけで、3,000 万円/W×25 MW = 750 兆円となる。これを無視できる程度の額（100 億円程度）にするには、約 10 万分の 1 のコスト削減が必要である。

大型加速器では、電力効率が極めて重要である。ILC の場合、主線形加速器部分で、商用電力からビームエネルギーへの変換効率は約 12% である。一方プラズマ加速について、現在では、レーザーの電力効率が 0.1%、レーザーからビームへの変換効率が 0.2% であり、電力効率は 0.0002% 程度である。これを ILC 並にするには、約 5 万倍の電力効率改善が必要である。

（４）プラズマ加速で達成しているパラメータのまとめ

表 IV-2-1 に、プラズマ加速で達成しているパラメータをまとめた表を示す。ILC 相当の加速器にするには、全てのパラメータを同時に満たす必要があるが、これらは各項目独立の達成値である。

表 IV-2-1 プラズマ加速で達成しているパラメータのまとめ

Parameters	達成値	目標値	目標値/達成地
ビーム強度(単段) 1バンチの電荷量 繰返し	10 pC ~ 100 pC 1Hz程度	1 nC 10 kHz	100 ~ 10 約 10000
多段加速 段数 多段加速効率 エネルギー	2段 数% 100 MeV	数10段 ~ 数100段 99.99% 250 GeV	数10 ~ 数100 約 50 2,500
陽電子加速	現実的なシナリオが無い		
コスト(500 GeV) レーザー(1Hz, PW, 30fs)	3,000万円/W x 25 MW = 750兆円	100億円程度	約 100000
電力効率 電源からレーザー レーザーからビーム 電源からビーム	0.1% 0.2% 0.0002%	10%	50,000

3) プラズマ加速適用可能性

ILCのような衝突型加速器では、物理実験が最終目的となる。このため、加速器の不確定要素は極力少ない方が確実な成果を期待できる。プラズマ加速は、ILCで、初期の実験で期待している成果を上げた後のアップグレード方向の一つとして、高エネルギー化が検討された場合の技術選択肢の候補となり得るかもしれない。その場合、初段からプラズマ加速を使うよりも、既に建設されて存在している加速器の出力ビームをプラズマ加速でブーストする方が現実的ではある。ただし、従来は50 fsの電子バンチの発生が困難であったため実験は失敗に終わっている。このためには、高効率・高繰り返しのPW級レーザーと準線形航跡場の励起・制御技術、多段加速技術が必須であるが、一部を除いて研究は具体化されておらず、時期の予測は困難である。また、日本ではこの種の産業はまだ発展途上にあり、人材育成から行う必要がある。現在は産業界などへの応用を可能にするプラズマ加速器を開発している段階である。約5年後には要素技術を、その後の5年間で例えばXFELなどに使える段階までにする計画はある(ImPACT)。高い信頼性が要求される医療応用などは、産業応用を目指した開発の派生、またはその後の段階であるといえる。欧米では、将来の加速器技術(ILC、LHCの後)の幅広い技術開発を行いつつある。それがDOEのレポートにあるレーザー加速、プラズマ加速、誘電体加速などである。ILC相当の加速器への応用は、これらの課題をクリアした後となる。

4) 研究開発に必要な期間及び費用

ILC相当の加速器をプラズマ加速の技術によって達成できるまでの研究開発コストを見積もることは困難と思われる。しかし、例えば、プラズマ加速でILC相当の加速器ができるまでの研究開発期間を仮定して、

$$\begin{aligned} \text{必要な研究開発コスト} &= \\ &\text{プラズマ加速の年間予算額(日本、あるいは世界)} \\ &\quad \times \text{研究開発期間の予測年数} \end{aligned}$$

を一つの目安とすることができる。以下に、参考となる数字として、日本が関連する年間予算額の見積もりと、米国のみに関連する予算と開発期間の見積もりを示す。

＊日本が関連する年間予算額：

(1) ImPACT 佐野プログラム、日本

http://www.jst.go.jp/impact/program/data/03_Zentai_Sano.pdf

レーザー加速 XFEL とレーザーの小型化開発含む。

開発期間 2014~2018(5 年間)

研究費 32.7 億円/5 年 = 6.5 億円/年

(2) EuPRAXIA、欧州

http://www.desy.de/news/news_search/index_eng.html?openDirectAnchor=867

2015.11 から 4 年間。

レーザー加速 XFEL のデザインスタディー。DESY を中心に欧州 16 機関が関与。

研究費 €3M/4 年 = 1 億円/年

(3) LBNL、ATAP、米国

<http://atap.lbl.gov/atap-news-february-2016/#moorefoundation>

3 年間のレーザー加速 XFEL プロジェクト。

Moore Foundation から (DOE ではない) 2016.2 月発表。

\$2.4M = 0.9 億円/年

日本のプラズマ加速の原理証明に関する予算は、これらの総額=8.4 億円/年 が主である。世界 (欧州、米国など) の各機関では別途予算手当はされている。米国の一部を以下に記載した。その総額は、日本の予算よりも遥かに多い。また、これらはレーザープラズマ加速の原理検証と性能向上試験の開発予算である。実際に ILC 相当の加速器の開発を達成するには、パワーレーザー開発費に更に大きな投資と期間が必要と思われる。

＊米国のみの関連予算例：

Accelerating Discovery A Strategic Plan for Accelerator R&D in the U.S. (April 2015)

によると、GARD プログラムで\$68M in FY2015 (mid-,long-term), Stewardship \$10M in FY2015 (near term) をサポートとある。

このうち、GARD で先端加速器 (レーザー加速、誘電体加速などを含む) で 15.9%+18.5% = 約 26 億円/年。

＊開発期間

Advanced Accelerator Development Strategy Report^[IV-2-2]

の 3 頁に LWFA で 2035-2040 ぐらいに multi-TeV e+e- collider とある。

これは技術成熟であり、建設はその後になる。

ANAR2017 会議の資料 Towards a Proposal for an Advanced Linear Collider Report on the Advanced and Novel Accelerators for High Energy Physics Roadmap Workshop^[IV-2-3] の 37 頁に EuCARD2 の roadmap があり、2035~とある。

いずれも 2035~となっているので、18~23 年後となる。しかし、これらはかなり楽観的な見方と思われる。

参考文献

[IV-2-1] http://icfa-usa.jlab.org/archive/newsletter/icfa_bd_nl_56.pdf

[IV-2-2] "Advanced Accelerator Development Strategy Report:DOE Advanced Accelerator Concepts Research Roadmap Workshop".

<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1358081>

[IV-2-3] "Toward a Proposal for an Advanced Linear Collider". The Advanced and Novel Accelerators for High Energy Physics Roadmap Workshop (NAR2017). (ANAR2017)ISBN 978-92-9083-468-7 (paperback)ISBN 978-92-9083-469-4

http://www.lpgp.u-psud.fr/icfaana/ANAR2017_report.pdf

V. まとめ

本調査研究において検討されたコスト削減につながる研究開発について、表 V-1 にまとめる。短期的に成果が得られるものから、長期的な研究が必要な項目まで挙げられているが、現在の進捗状況をもとに以下のように分類した。

1) 加速器本体（加速器土木を含む）の研究開発項目

（1） 現在コスト削減のための研究開発が進められているか、ほかの加速器プロジェクトで採用されつつある項目

下記のものは、すでに ILC コスト削減のために研究開発が進められているか、あるいはほかのプロジェクトで採用されつつある項目で、研究開発として短期的なスパンで結果を出すことが見込めるものである。

削減効果については、加速器土木を含む加速器本体の建設費用（TDR で 7,980 MILCU*、日本円換算で約 8,300 億円）に対するコスト削減の割合を示した。

*ILCU は 2012 年 1 月の米国ドルで定義される仮想通貨。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導 高周波空洞材料の低価格化	～3 年	1.3 億円	1.2～2.5%
高電界・低損失実現のための超伝導高周 波空洞の表面処理 (N-Infusion)	～3 年	7.7 億円	2.7～5.5%
N-Infusion によるトンネル長の削減*			0～1.6%
N-Infusion 活用のための 高周波系の研究開発	～4 年	3.7 億円	0.3～0.5%
入力カプラ	～5 年	0.4 億円	0.5～1%
電解研磨	～3 年	2.4 億円	1.3～2.6%
DR および RTML、BDS での 永久磁石の利用	～3 年	0.5 億円	消費電力最大 10.5 MW (偏向磁石) および 9.1 MW (四極磁石)の節約

*N-Infusion が成功した場合、空洞数は 10%削減されるが、アンジュレータ方式の陽電子生成の場合は、電子と陽電子を衝突させるタイミングをそろえるためにトンネルの長さに制約が入り、トンネル長は短くならない。その場合、削減効果は見込めない。

これらの研究開発項目は、たとえば、N-Infusion が成功した場合は空洞台数が減るため材料の費用や入力カプラの個数なども減少する。このため、最終的な成果は単純な足し算とならないことに注意が必要である。3～5 年で実現できる研究開発がすべて成功した場合は、前に述べたような重複効果を除くと、TDR (ILC 500 GeV) の場合、5～11%程度となる。

（2） 中長期的な研究開発課題（10 年程度の研究開発期間を要するもの）

下記の二つの研究開発項目は、2015 年の ILC Progress Report^[1-2-1]にも記載されており、将来有望な

研究開発項目であるが、実用化のためには、まだ 10 年程度のスパンの開発期間が必要と考えられる。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
超伝導薄膜	10～20 年	11.3 億円 (10 年)	10 年後で 2～4%
液圧成形	～10 年	3.2 億円	1～2%

(3) 加速器土木関係の研究開発項目

下記のうち、中央シールド壁厚変更、ヘリウム冷凍機配置変更、測定器ホールアクセスの最適化については、TDR 以降に LCC 内で検討され ILC Progress Report^[V-1]に記載されている項目で、すでに概略については評価が行われているものである。削減効果については、加速器土木を含む加速器本体の建設費用（TDR で 7,980 MILCU、日本円換算で約 8,300 億円）に対するコスト削減の割合を示した。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発に必要な費用	研究開発による削減効果
中央シールド壁厚変更	机上検討 2 ヶ月	500 万円	1.5%程度
ヘリウム冷凍機配置変更	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.1%程度
測定器ホールアクセスの最適化	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.1%程度
加速器配置の最適化	机上検討 2 ヶ月	500 万円	0.2%程度

2) 測定器本体の研究開発項目

測定器本体については、「リターンヨークの鉄の量の削減」および「新しい超伝導線材の開発」がコスト削減の可能性がある項目として挙げられている。コスト削減に関する検討が ILC の LCC 内でも検討が始まったところであり、コスト削減の効果の評価についてはまだ見極められていない。

3) 超伝導加速以外の加速方式

今回、常伝導リニアコライダー（CLIC）およびプラズマ加速についても調査を行った。CLIC は ILC より高い衝突エネルギー（3 TeV）を最終ゴールとしており、まだ研究開発が必要な段階である。コスト的には誤差の範囲で ILC と同じと評価された。プラズマ加速については、コスト削減の効果は見通せなかったが、将来的に有望な加速器技術と考えられる。

項目	研究開発に必要な期間	研究開発による削減効果
常伝導リニアコライダー	8 年 ^[V-2]	－
プラズマ加速	18～23 年 ^[V-3,4]	現在のところ、削減効果は見通せない。しかし、将来的に非常に有望な次世代加速器技術である。

参考文献

- [V-1] Linear Collider Collaboration,” The International Linear Collider Progress Report 2015”, July, 2015.
- [V-2] Philip Buerrows,” CLIC Accelerator Status and Optimisation”, LCWS2017,
https://agenda.linearcollider.org/event/7645/contributions/39681/attachments/32179/48789/LCWS_Oct2017.pdf
- [V-3] ”Advanced Accelerator Development Strategy Report:DOE Advanced Accelerator Concepts Research Roadmap Workshop”.
<https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/1358081>
- [V-4] “Toward a Proposal for an Advanced Linear Collider”. The Advanced and Novel Accelerators for High Energy Physics Roadmap Workshop (NAR2017).
http://www.lpgp.u-psud.fr/icfaana/ANAR2017_report.pdf

表 V-1 コスト削減のための研究開発項目

エリアシステム	項目	概要	現在の状況
ダンピングリング RTML 最終収束系	DRおよびRTML、BDSでの永久磁石の利用	DR、RTMおよびBDSには、合計で約1,000台の偏向磁石、約2,000台の四極磁石が使われる。これらの電力は計20MWである。大型放射光高度化のR&Dから、特に偏向磁石の永久磁石化は実現の可能性が高いと考えられる。四極磁石の開発が進めば、大幅な消費電力の削減が見込まれる。	ILCビームラインでの永久磁石を利用する設計はまだ無いが、他の加速器計画ではR&Dが進められている。ESRF高度化計画では、永久磁石型偏向磁石の採用が決定し、128台の半数近くまで製造が進んでいる。永久磁石型四極磁石についてはR&Dの段階であり、京都大学やCERNなどで試作による性能評価が行われた。
主線形加速器	低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化	超伝導空洞ではニオブを材料としているが、ニオブは希少金属であるため高価なものとなっている。材料は、低温と室温との抵抗比(RRR)が300以上という仕様がある。RRRを下げ、また、製造方法を簡略することでニオブ板材料のコスト削減を目指す。	RRRが300以下で、インゴットから直接スライスしたニオブ材料を使って3セルの空洞を製造しようとしている段階。インゴットからの材料は粒径が大きいため工夫が必要だが、熱処理工程により改善が期待できることがわかった。
	高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)	超伝導空洞の高性能化を目指した新たな表面処理方法の研究である。加熱真空炉での800℃高温熱処理後の冷却の際に120℃にて約3Paの窒素を48時間導入する。約10%の加速勾配の向上、空洞表面損失の約50%低減などの効果が見込まれる。	日・米・独の研究所でR&Dが進められている。フェルミ研究所では単セル空洞・9セル空洞で良好な結果を得ている。KEKでも単セル空洞にて成功例が示された。一方で真空炉の清浄度が非常に重要である、という事もわかってきた。
	N-Infusion活用のための高周波系の研究開発	高電界の超伝導空洞に対応した大電力高周波源として、パルス幅を延長したマルクス型電源と高出力かつ高効率のクライストロンの開発を進める。 高周波源1ユニットのコストは高くなるが、ユニット数が減少することにより高周波源全体でコストダウンになると見込んでいる。	マルクス型電源は、セル数増加や内部キャパシタ増強でパルス幅の延長に対応可能である。 高出力、高効率化のクライストロンについては、計画中の加速器(CLICやCEPC、FCC)でも開発が進められている段階である。
	入力カブラ	カブラはクライストロンから発生した大電力高周波を空洞へ送り込むための同軸型の高周波機器のことである。真空と大気を分かつために窒化チタンコーティングが施されたセラミックの窓が2つ設けられている。	現在は窒化チタンコーティングを用いない特殊なセラミックおよびセラミックの特性の内、重要なパラメータ(絶縁抵抗率、誘電率、誘電損失、二次電子放出係数)についての調査・研究を行っているところである。
	電解研磨	コスト削減効果のある電解研磨処理の候補は、縦型電解研磨設備とバイポーラ電解研磨方式の採用である。空洞の電解研磨装置の簡素化をはかり設置専有面積を小さくする。さらにバイポーラ電解研磨では、濃硫酸とフッ化水素酸の混合液を、希硫酸溶液に置き換えることが可能となり、電解液循環装置の製造コスト低減と廃液処理コストの低減、希硫酸を扱う作業では危険度リスクが大幅に下がり、かかる人件費も下がる。	開発途上の技術であり、縦型電解研磨装置およびバイポーラ電解研磨に必要な解決すべき開発は (1)カソード電極から発生する水素泡除去の開発 (2)バイポーラ電解研磨時の電気的パラメータの開発および最適な電解液の選択、である。
	超伝導薄膜	超伝導加速空洞の加速電場の限界は空洞内表面に欠陥がなければ表面物質の持つ臨界磁場H _c で決まる。ニオブ加速空洞内面に超伝導体による多層薄膜構造を作ると臨界磁場を上げられ、加速電場の限界を引き上げることが可能になり、リニアコライダー加速器の短縮化が実現する。	超伝導体薄膜の研究は世界中で競って行われており、おもな研究機関は、フェルミ研究所、ジェファーソン研究所、コーネル大学、サクレイ研究所、ブッパータル大学などであり、スパッター法が主流であるが、フェルミ研究所はスパッタ法の平行してメッキ法も追求している。ALD研究はKEKとサクレイ研究所が追求を行なっている。どの研究機関も十分な性能の薄膜を製造できていない。
	液圧成型	空洞製造の際にコスト上昇の主な原因となる電子ビーム溶接を用いない液圧成形では空洞製造のコストを大幅に削減することが可能である。この液圧成形による空洞製造をILCに導入するのに必要な開発内容等に関してまとめた。	液圧成型による空洞製造は様々な研究所で行われているが、1本のニオブパイプからの9セル空洞の製造には未だどこも成功していない。KEKでも3セルの空洞までは製造した段階である。

エリアシステム	項目	概要	現在の状況
加速器土木	中央シールド壁厚変更	主リニアックトンネル内の中央シールド壁の厚さ変更によりコスト削減を行う。	TDR後に設計変更がなされているが、詳細検討は終わっていない段階。
	ヘリウム冷凍機配置変更	ヘリウム冷凍機の地上部・地下部の機器配置変更によりコスト削減を行う。	TDR後に設計変更がなされているが、詳細検討は終わっていない段階。
	検出器ホールアクセスの最適化	検出器ホールへのアクセス方法の変更とアクセストンネルの最適化によりコスト削減を行う。	TDR後に設計変更がなされているが、詳細検討は終わっていない段階。
	加速器配置の最適化	候補地サイトへの加速器配置の最適化とアクセストンネル長の最短化によりコスト削減を行う。	実際のサイトが決まった後に最適化を行うもの。
測定器	リターンヨークの鉄の量の削減	鉄の量を減らしても、もう一方の測定器への漏れ磁場を要求値以下に抑えられるリターンヨークの開発。シミュレーション、実現可能性の検討、測定器近傍に置かれる機器の磁場耐性の向上がR&Dの課題。	ドイツのDESY研究所のグループにより、いくつかの単純化されたモデルについて、磁場の3次元計算が行われ、2つの測定器の間に鉄の磁気遮蔽壁を置くことでリターンヨークの鉄の量を削減する方法が有望であると見込まれている。
	新しい超伝導線材の開発	測定器用超伝導電磁石に用いられる超伝導線材として、TDRで仮定されているCMSタイプの物に比べて単純な構造の線材を開発し、それによって工程を減らし、コスト削減を狙う。	安定化材としてAl-Niを用いる方法と、銅の比率を高めたラザフォードケーブルと高強度アルミ合金の安定化材を組み合わせた方法が考えられている。
超伝導以外の加速方式	常伝導リニアコライダー	常伝導加速空洞の技術をつかったリニアコライダー。現在設計報告（Conceptual Design Report）の出ているものとして、CLIC（Compact Linear Collider）がある。これは、2ビーム方式によるもので、低エネルギー大電力長パルスリナック（駆動リナック）で加速した電子ビームを分割して減速管（PETS）を通し、その時に発生する高周波を常伝導空洞にフィードして電子・陽電子を加速するもの。CDRIは500 GeVの設計を記述しているが、最終目標は3TeVである。したがって、技術目標もILCより高度である。	駆動リナックは極めて高い電力効率を要求する。原理実証は行われたが、安定性・長パルスなどの詰めが必要。PETSは90%以上の電子エネルギーを高周波に変換しなければならない。現在までに実験はまだ30%台である。ILCよりさらに小さいビームを衝突させるために、リナックでのエミッタンス増加を抑えること、最終収束系で非常に小さく絞ること、が課題である。前者は地盤変化を検出してフィードバックする装置の試験が行われた。後者はKEKのATF2で試験中。
	プラズマ加速	プラズマとは、気体の電子と原子核が分離した状態である。従来のマイクロ波加速と比較して、原理的には100倍もの加速勾配を得ることができるが、実際の加速器として実現するためには多くの課題があり、現在のところコスト削減の技術候補とはならない。	ビーム電流強度を約100,000倍にする必要がある。10－100の多段加速が必要だが、2段の実証実験が存在するのみ。99.99%のビーム加速効率が必要であるが、現在は数%を実現。陽電子を加速する現実的なアイデアは無い。レーザー発生器について1/100,000のコスト削減が必要。電力効率について50,000倍の改善が必要。

(補遺)

A. ILC 250 GeV ステージングについて

1) ILC 250 GeV の構成

2017 年 11 月に国際将来加速器委員会 (ICFA: the International Committee for Future Accelerators) は、250 GeV で運用する国際リニアコライダー (ILC) の建設を支持する声明を発表した。リニアコライダー・コラボレーション (LCC: Linear Collider Collaboration) より提出されたマシンレポート^[A-1]及び物理レポート^[A-2]に基づくものである。

このマシンレポートでは、ILC 250 GeV の構成として、Option A, B, C の三つの検討がなされており、それぞれ、加速器は 250 GeV 衝突エネルギーを実現するものであるが、Option A が 250 GeV 用のトンネルであるのに対し、Option B および C では、350 GeV および 500 GeV にエネルギー増強可能なシンプルなトンネル（中央部の隔壁がなく、また、空調もない）を含んだ構成となっている。いずれの場合も主線形加速器部分の長さが半分となり、全長が 20 km 程度となる。(図 A-1)

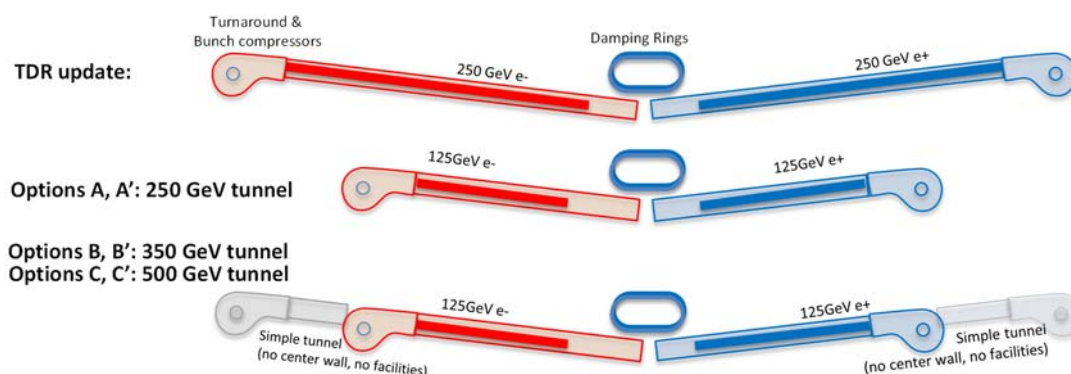


図 A-1 ILC 250 GeV で検討されている加速器形状の模式図（出典：文献 A-1）

また、本調査研究でも取り上げた、以下の研究開発が成功した場合のコスト削減の効果も繰り込んだコスト見積もりも行われている。

- 低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化
- 高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理 (N-Infusion)
- 入力カプラ
- 電解研磨

これらは、Option A', B', C' と定義されている。Option A~C, A'~C' のコストについては、本調査研究と同様、TDR のコストとの比較において算出されている (TDR と同時期の物価、為替レートなどを前提に比較されている)。見積もられているコストについて表 A-1 にまとめる。Option A の建設コスト 5,260 MILCU および研究開発が成功した場合を繰り込んだ Option A' の建設コスト 4,780 MILCU は、TDR の建設 7,980 MILCU から 8,300 億円を算出した割合 ($\times 8,309/7,980$) から算出すると、それぞれ 5,477 億円、4,977 億円となる。

表 A-1 ILC 250 GeV のコスト見積もり（出典：文献 A-1）

	e+/e- collision [GeV]	Tunnel Space for [GeV]	Value Total (MILCU)	Reduction [%]
TDR	250/250	500	7,980	0
TDR update	250/250	500	7,950	-0.4
Option A	125/125	250	5,260	-34
Option B	125/125	350	5,350	-33
Option C	125/125	500	5,470	-31.5
Option A'	125/125	250	4,780	-40
Option B'	125/125	350	4,870	-39
Option C'	125/125	500	4,990	-37.5

2) ILC 250 GeV におけるコスト削減効果

削減効果は、Option A のコスト 5,260 MILCU の日本円への TDR 当時の単純換算 5,470 億円に対するコスト削減による割合で示している。ILC 250 GeV の場合は、主線形加速器の長さが約半分となるため、超伝導直線加速器部分に関するコスト削減額は約半額となる。（全体の建設コスト自身も下がるため、ILC 500 GeV の場合と比較すると ILC 250 GeV の場合の削減効果の割合は 80%程度となる）

項目	研究開発による ILC 250 GeV における削減効果
低コスト・ニオブ材料の活用による超伝導高周波空洞材料の低価格化	0.9～1.9%
高電界・低損失実現のための超伝導高周波空洞の表面処理(N-Infusion)	2.0～4.1%
N-Infusion によるトンネル長の削減*	0～1.2%
N-Infusion 活用のための 高周波系の研究開発	0.2%～0.4%
入力カブラ	0.4～0.8%
電解研磨	1.0～2.0%

前に述べたような重複効果を除くと、ILC 250 GeV の場合、4～8%程度のコスト削減効果となる。

また、III-10 で述べた、加速器土木に関するコスト削減については、TDR 以降に LCC 内で検討され ILC Progress Report^[A-3]に記載されている項目で、これらの提案を含んだものとなっており新たに削減されるものではない。

参考文献

- [A-1] L. Evans and S. Michizono, “Machine Staging Report 2017”, arXiv: 1711.00568 [hep-ex].
- [A-2] K. Fujii, et al. [LCC Physics Working Group], "Physics Case for the 250 GeV Stage of the International Linear Collider", arXiv:1710.07621 [hep-ex].
- [A-3] Linear Collider Collaboration, "The International Linear Collider Progress Report 2015", July, 2015.