

平成 26 年度加速器製造に関わる要素技術の分析  
及び県内企業の加速器産業への参入可能性調査

報告書

2015 年 3 月 30 日

公益財団法人 いわて産業振興センター

協力 地方独立行政法人 岩手県工業技術センター

## 目 次

1.	調査の背景・目的	-----	1
1.1	国際リニアコライダー（ILC）を巡る状況	-----	1
1.2	岩手県における加速器産業への参入可能性調査（目的と項目）	-----	3
2.	先端加速器の概要と特徴	-----	4
2.1	加速器の概要	-----	4
2.2	東北地域における加速器計画	-----	4
2.3	放射光施設	-----	5
2.4	加速器の医療機器への利用	-----	6
3.	国際リニアコライダー（ILC）の構成と機器・設備	-----	8
3.1	電子源	-----	9
3.2	陽電子源	-----	10
3.3	LTR（リニアックトランスマスファーリング：Linac Transfer Ring）	-----	11
3.4	ダンピングリング（Damping Ring）	-----	11
3.5	RTML(Ring To Main Linac)	-----	12
3.6	超電導加速空洞	-----	13
3.7	クライオモジュール	-----	15
3.8	ビームデリバリーシステム（BDS：Beam Delivery System）	-----	19
3.9	測定器	-----	21
3.10	ILC の高周波源	-----	21
3.11	電磁石と電源	-----	21
3.12	ILC のビーム粒子のフローと機器・設備	-----	24
4.	超伝導加速空洞とクライオモジュールの製造技術と参入に際しての課題	-----	26
4.1	超伝導加速空洞	-----	26
4.2	クライオモジュール	-----	32
4.3	参入に際しての課題	-----	39
5.	加速器関連産業	-----	42
6.	参入に向けた取組事例	-----	44
7.	加速器関連産業への参入に関する意向調査	-----	47
8.	加速器関連産業への参入に向けた課題と提言	-----	49

## 1 調査の背景・目的

本章では調査の背景・目的について説明する。

なお、章末出典資料の文章の一部や図表を引用し、これを編集する内容とした。

### 1.1 國際リニアコライダー (ILC : International Linear Collider) を巡る状況

#### (1) ILC とは<sup>1)</sup>

ILC は、全長 30 km を超える地下トンネルに、直線状の加速器を設置し、電子と陽電子を光速に近い速度まで加速し衝突させることにより、宇宙初期（宇宙誕生から 1 兆分の 1 秒後の状態）に迫る高エネルギーの反応を作り出し、宇宙創成の謎、時間と空間の謎、質量の謎を解明しようとする大規模研究施設である。

#### (2) ILC に期待されること

「宇宙がどのように始まったのか」。ILC は、まさにこの謎に答えるために計画されている。

宇宙は 138 億年ほど前に始まったとされ、宇宙の始まりの様子は、様々な望遠鏡で観測されているが、宇宙の初めの 38 万年間は、あまりに高温（高エネルギー状態）で、検出可能な光（電磁波）が放出されないため望遠鏡で観測することはできない。このため、宇宙誕生のときと同じような高エネルギー状態を作り、そこで起こる現象を調べることで、宇宙誕生の様子を再現する。これが ILC などの大型加速器に期待されていることである。

この大型加速器で代表的なものが、現在スイスとフランスの国境にある欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) であり、LHC では、高エネルギーで陽子と陽子を衝突させて、衝突から生じる粒子を観測している。2013 年には、物質に質量（重さ）を与えるとされるヒッグス粒子とみられる新素粒子の発見が発表されている。ヒッグス粒子は、多くの宇宙の謎の解明に繋がる重要な「鍵」として期待されているが、LHC は、素粒子の性質などを精密に測定することは得意としていないため、ヒッグス粒子などの素粒子を精密に測定できる次世代加速器として ILC の建設が期待されている。

#### (3) ILC 計画の検討経緯

##### ア 國際的な検討<sup>2)</sup>

リニアコライダー計画は、1980 年代から、ドイツ、アメリカ、日本などを中心に個別に検討が進められた。日本では、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) を中心に研究が進められ、1997 年には、Japan Linear Collider Design study としてまとめられている。

欧州では、CERN とドイツ電子シンクロトロン (DESY) や北米の SLAC 国立加速器研究所でも類似の計画が構想された。

2000 年代に入り、リニアコライダー計画を国際プロジェクトとして一本化する機運が高まり、2004 年に 国際技術推奨委員会 (International Technology Recommendation Panel (ITRP)) が超伝導加速技術等を採用する勧告を行ったことを受け、国際協力による一本化が決まり、“International Linear Collider” (ILC) として推進されることになった。

2005 年には、加速器設計のための国際協力チーム (Global Design Effort (GDE)) が立ち上がり、2007 年に「ILC の基本設計書 Reference Design Report (RDR)」が、2013 年に「ILC 技術設計報告書 Technical Design Report (TDR)」が、GDE から発表されている。

##### イ ILC 建設候補地域の絞り込み<sup>3)</sup>

ILC の国内の建設候補地は、当初、10 カ所余り挙げられていたが、平成 22 年に岩手県と宮城县にまたがる北上山地と福岡県と佐賀県にまたがる脊振山地の 2 カ所に絞り込まれた。

その後、この 2 ケ所について地質調査などを実施し、「ILC 戦略会議」の下にある「立地評価会

議」が、技術評価（地盤の安定性や活断層などの検討）や社会環境基盤評価（交通インフラや生活環境などの評価）を行い、平成 25 年 8 月 23 日に国際リニアコライダーの国内候補地として、北上山地が最適であるとの評価が発表された。（図 1.1）



図 1.1 ILC 建設候補地<sup>4)</sup>

#### ウ 日本学術会議の所見<sup>5)</sup>

日本学術会議は、文部科学省（研究振興局長）から平成 25 年 5 月 27 日付で「ILC 計画に関する学術的見地からの検討」についての審議を求められ、平成 25 年 9 月 30 日付で文部科学省に「回答 国際リニアコライダー計画に関する所見」を提出した。

回答書では、ILC 計画の意義と我が国への誘致を検討する際の論点を

- ① 電子・陽電子衝突型加速器の必要性と意義及びその次期計画としての ILC の位置づけ
  - ② ILC 計画の我が国での実施の可否判断に向けた諸課題の検討
- の 2 段階に整理し、

ILC が担う高エネルギー素粒子物理学は、基礎科学の中でも最も基礎的な分野であり、学術的意義は認められる、などの所見を示す一方、現状では、国内の実施体制、海外からの研究者の参加の見通し、必要経費の国際分担の見通しなどの重要事項に関して不確定要素やリスク要因がある、などの所見を示している。

日本学術会議としては、「ILC 計画の実施の可否判断に向けた諸課題の検討を行うために必要な調査等の経費を政府においても措置し、2~3 年をかけて、当該分野以外の有識者及び関係政府機関も含めて集中的な調査・検討を進めること、を提言する。」とし、検討するべき重要課題として、以下の 5 点を示し、「これらの課題について明確な見通しが得られることが必要である。」と回答している。

- ① 高度化される LHC での計画も見据えた ILC での素粒子物理学研究のより明確な方針
- ② 国家の諸課題への取り組みや諸学術分野の進歩に停滞を招かない予算の枠組み
- ③ 国際的経費分担
- ④ 高エネルギー加速器研究機構(KEK)、大学等の関連研究者を中心とする国内体制の在り方
- ⑤ 建設期及び運転期に必要な人員・人材、特にリーダー格の人材

## **工 文部科学省有識者会議<sup>6)</sup>**

文部科学省は、日本学術会議からの提言について専門的見地から議論を行うため、「国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議」を設置した（設置期間：平成26年5月1日～平成28年3月31日）。

有識者会議には、素粒子・原子核物理作業部会（座長：梶田 隆章 東京大学宇宙線研究所長）と技術設計報告書（TDR）検証作業部会（座長：横溝 英明 一般財団法人総合科学的研究機構東海事業センター長）の2つの部会が設置されている。

会議は、平成27年度中に一定の結論を出すこととしている。

### **1.2 岩手県における加速器産業への参入可能性調査（目的と項目）**

高エネルギー物理研究者会議による評価<sup>3)</sup>として、岩手県北上山系が ILC 候補地域に絞り込まれたことなどにより、県内企業の加速器産業についての関心が高まっているものの、ILC を構成する加速器などの製造工程や、工程ごとに求められる技術・機械設備等についての情報が少ないため、これらの情報を収集し県内企業に提供して、参入に向けた具体的なイメージを持ってもらう必要がある。

このため、県では、平成26年4月に「加速器製造に関わる要素技術の分析及び県内企業の加速器産業への参入可能性調査」の委託を公募した結果、公益財団法人 いわて産業振興センターが受託した（期間：平成26年5月23日～平成27年3月31日）。

#### **[調査目的]**

調査の主な目的は、加速器の製造工程を分析し、工程ごとに求められる技術や必要となる機械・設備等を明らかにすること。県内企業の加速器産業への参入可能性調査や報告会を開催することなどにより、県内企業の加速器産業への参入につなげること。

#### **[調査項目]**

- ① 加速器製造に関わる要素技術の分析
- ② 県内企業の加速器産業への参入可能性調査
- ③ 加速器関連産業参入報告会の開催
- ④ 県内企業紹介資料の作成

### **参考文献、参考資料、出典資料**

- 「宇宙を創る実験」 村山斉編著 集英社新書
- 1) 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)HP : リニアコライダー 発展の歴史
- 2) 榎本 収志, “ILC 施設”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’14, 2014年9月11日
- 3) ILC 戦略会議, “[プレスリリース】国際リニアコライダー国内候補地の立地評価会議の結果について”, 2013年8月23日
- 4) 山本 明, “ILC の準備状況”, 第2回加速器連産業参入セミナー, 2015年2月16日
- 5) 日本学術会議, “回答 国際リニアコライダー計画に関する所見”, 平成25年(2013年)9月30日
- 6) 文部科学省 HP : 国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議, “国際リニアコライダー（ILC）に関する有識者会議の設置について”, “委員名簿”

## 2. 先端加速器の概要と特徴

本章では先端加速器の概要と特徴について説明する。

なお、章末出典資料の文章の一部や図表を引用し、これを編集する内容とした。

### 2.1 加速器の概要

加速器は、電磁波などを使ってイオンや電子などの荷電粒子にエネルギーを加え加速する装置であり、学術研究や科学技術の基礎的・応用的研究に利用されているほか、産業分野やがん治療などの医療分野などで使われている。

加速器には、線型加速器と円形加速器がある。

#### (1) 線形加速器と円形加速器

加速器には、粒子を直線上に連続して加速する線形加速器と荷電粒子に円形の軌道を描かせながら加速する円形加速器がある。

線形加速器は、エネルギーの大きなものを作ろうとすると加速器の長さを長くする必要があるため、これまでの線形加速器の加速エネルギーは数百 MeV 程度までが限界であった。それ以上のエネルギーを必要とする場合は円形加速器が用いられる。

円形加速器は、加速されるにつれて軌道半径が大きくなるサイクロトロンと、加速エネルギーにあわせて磁界を変化させ、加速粒子が常に一定半径の軌道を周回するようにしたシンクロトロンがある。

#### (2) サイクロトロンとシンクロトロン<sup>1)</sup>

サイクロトロンは、ラジオアイソトープの製造や中性子の発生、核構造・核反応の研究、陽子線治療などに幅広く利用されているが、加速エネルギーには制限がある。

シンクロトロンは、サイクロトロンと異なり、磁場を強くするとともに加速周波数を変化させて軌道半径を一定に保ちながら荷電粒子を加速するのが特徴。シンクロトロンは、他の加速器に比べて高速の粒子ビームを得られることから、素粒子実験、放射光の生成、医療用の陽子、重粒子線源など広く用いられている。代表的な高エネルギー実験用加速器としては CERN の LHC、日本の高エネルギー加速器研究機構のトリスタン/B ファクトリー、兵庫県にある SPring-8 などが挙げられる。

### 2.2 東北地域における加速器計画

東北地域では、下図に示すように、南東北がん陽子線治療センター、東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター、東北大学電子光理学研究センター、仁科記念サイクロトロンセンター、秋田県立脳血管研究センター、日本原子力研究開発機構の 6 つの加速器関連施設が稼動しており、この他にも ILC 計画など 5 つの施設の整備計画がある。



図 2.1 東北における加速器関連施設整備計画（構想ベースを含む）<sup>2)</sup>

### 2.3 放射光施設

放射光は、加速器の中で電子の軌道が曲げられる時に出る電磁波で、普通「光」と呼ばれる可視光からX線までその波長範囲がとても広く、物質の研究、生命科学の研究に用いられている<sup>3)</sup>。

放射光は1947年に電子シンクロトロン（電子加速器）で初めて観測された。放射光は、電子のエネルギーが高いほど指向性の良い明るい光となり、また、電子のエネルギーが高く進む方向の変化が大きいほど、X線などの短い波長の光を含むようになる。電子は負の電荷をもっているためその周りに電場をつくっているが、これは仮想の光子を雲のようにまとっていると考えられる。高エネルギーの電子が磁場で曲げられると仮想の光子が振り落とされて現実の光子となって放出されるのが放射光である<sup>4)</sup>。（図2.2）

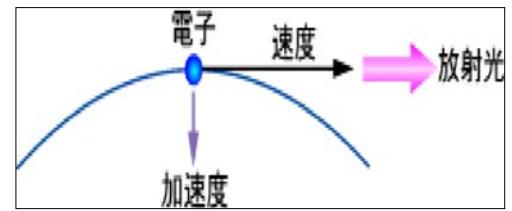


図 2.2 放射光の発生原理<sup>4)</sup>

日本では、兵庫県の「SPring-8」など9施設が稼動しており、また、東北地域では「東北放射光施設」などの誘致を進めている。

#### ア 大型放射光施設 (SPring-8)<sup>5)</sup>

SPring-8 (Super Photon ring-8GeV) は、兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出すことができる大型放射光施設である。放射光の発生装置は、電子ビームを発生させ光速近くまで加速するための加速器（入射系加速器）と、その電子ビームを円形の軌道に貯めておくための加速器（蓄積リング：周長 1.436km）で構成されている。



図 2.3 Spring-8<sup>5)</sup>

SPring-8は、軟X線から硬X線までの広いエネルギー範囲で、世界最高輝度の放射光を発生で

きる上、高エネルギーガンマ線（1.5–2.9 GeV）や赤外線も利用が可能であることから、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究が行われている。（図 2.3）

#### イ 東北放射光施設<sup>6)</sup>

日本には、放射光施設が大小 9 施設あるものの、中型高輝度放射光施設が存在しないなど、放射光をツールとした研究開発競争において、世界的に大幅な遅れを取っている。このため、放射光施設の空白域である東北地方の 7 国立大学は「東北放射光施設推進会議」を設立し、世界でも最先端の性能を誇る中型高輝度放射光施設の東北地方への設置を目的とした「東北放射光施設構想」を提唱し、設置に向けた様々な取組みを推進してきた。そのような観点から、「東北放射光施設構想」の実現を加速化するため、東北地方の产学研官 27 団体が一体となり、平成 26 年 7 月 18 日に「東北放射光施設推進協議会」を設立した<sup>6)</sup>。

表 2.2 Spring-8 との比較表<sup>6)</sup>

##### ・〈東北放射光施設の特徴〉

「国内にはない 3GeV・高輝度・低エミッタスの施設」

- ・軟 X 線領域において小さい焦点まで明るい。  
⇒ 材料表面の詳細分析が可能、分析時間の大  
幅短縮（例 10 日→1 秒）
  - ・大幅なコンパクト化、省エネ化。  
⇒ 直径 100m（周長 340m）
- 東北放射光施設の 3GeV は軟 X 線、Spring-8 の 8GeV は硬 X 線の出力に最適とされる。
- ・軟 X 線は材料表面→産業利用に適した領域
  - ・硬 X 線：材料内部 ⇒ 最先端の学術利用が中  
心産業利用が促進され新たな技術開発が期待さ  
れる。

	Spring-8 国内代表的 施設(兵庫)	東北放射光施設 で目指しているス ペック
形 状	リング型	リング型
周 長	1,436m	340m
加速エネルギー (出力)	8GeV	3GeV
輝 度 (光の明るさ)	$10^{18}$ (1倍)	$10^{21}$ (1,000倍)
水平エミッタス (光の収束度)	3.4nmrad	1.1nmrad
得意とする 波長領域	硬X線 (材料内部の分析)	軟X線 (材料表面(炭素や酸素など軽元素)の分析)
消 費 電 力	約30MW	約3.7MW (メガワット)

大幅なコンパクト化

世界のトレンドである加速エネルギー

SPRING-8の1,000倍の明るさ

極限まで焦点を絞った高解像度化(アジアNO.1)

得意領域を国内で相互補完

大幅な省エネ化

## 2.4 加速器の医療機器への利用

### (1) 診断（撮影）への利用

#### 陽電子放射断層撮影(PET : Positron Emission Tomography)

がんを検査する方法の一つで、がん細胞が正常細胞の何倍ものブドウ糖を取り込む性質を利用し、ブドウ糖に陽電子を発生させるフッ素 18 などの同位元素を含む検査薬を使用する。投与された検査薬が、がん細胞に取り込まれ、陽電子と電子が結合して発生するガンマ線を検出することによりがん細胞を見つける。体外から X 線を照射して画像を撮影するレントゲンとは異なり、体内から発生するガンマ線を検出する検査である。

### (2) 放射線治療への利用<sup>7)</sup>

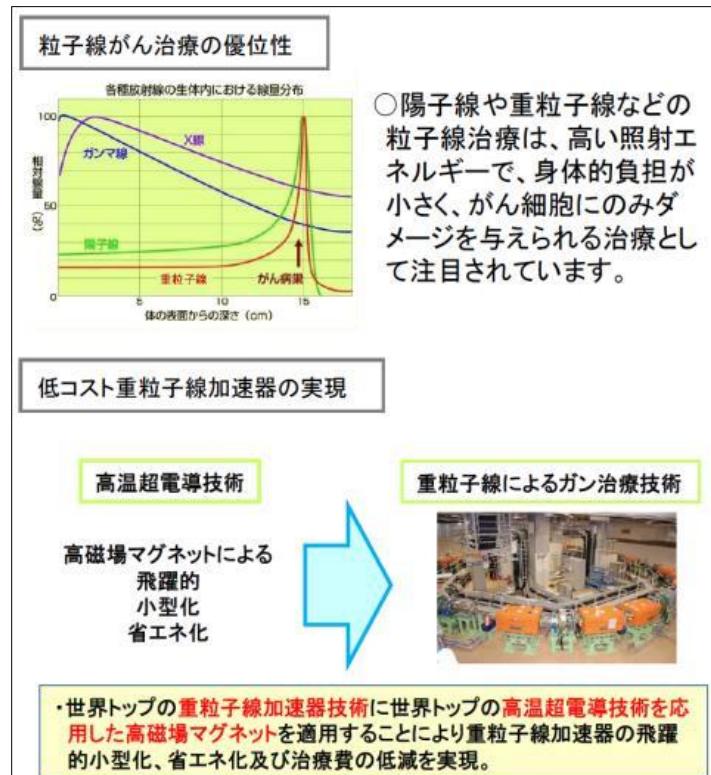
がんは昭和 56 年から我が国の死亡原因の第一位となっており、放射線治療は、ほとんど全てのがんの治療に使用されている。

## 重粒子線治療

重粒子線治療器については日本が世界に先駆けて基本的な治療方法を確立している。放射線治療のうち重粒子線治療は、外科療法と同程度以上の治療効果を有しており、再発やX線、電子線治療では治らない患者、サイズの大きながんに有効な治療法であることから、X線といった放射線治療と競合することではなく、むしろ、CTとMRIのように市場の相乗効果を生む可能性がある。

放射線を受ける新患患者は現在20万人/年程度であるが2015年には35万人/年、2020年には40万人/年程度になると予測されており、重粒子線治療の利用は、今後、増える可能性が高いが、現状では、加速器による治療システムが大規模で高価なため、低成本化による治療費の低減が課題である。

このため、高温超電導マグネットによる高磁場化、要素機器等の小型化により、従来の装置より設置面積・エネルギー消費量を1/4に低減し、大幅に小型化、省エネ化を図る研究開発を行い低コストの重粒子線加速器の実現が試みられている（図2.4）。



## 参考資料、出典資料

- 1) 原子力百科事典 (ATOMICA) HP：“加速器（高エネルギー放射線発生装置）（08-01-03-02）”
- 2) 高玉昌一，“ILCの誘致に向けての地域の課題”，岩手経済研究, 2014年8月号
- 3) 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) HP：“放射光施設”
- 4) Spring-8 大型放射光 HP：“放射光の原理”
- 5) Spring-8 大型放射光 HP：“Spring-8 の特徴”，“Spring-8 とは”
- 6) 東北放射光施設推進協議会 HP：“トップページ”，“東北放射光施設の概要”
- 7) “医療用超電導加速器システム研究開発事前評価報告書”，経済産業省産業構造審議会産業技術分科会評価小委員会, 平成24年6月

### 3. 国際リニアコライダー (ILC) の構成と機器・設備

リニアコライダーの建設にあたっては、機器・設備の構成を良く理解し、それらを製造するために必要な要素技術を把握する必要がある。本章では ILC を構成する機器・設備について説明する。

なお、本章は極めて専門性の高い内容であり、正確を期すことが求められる。従って、章末出典資料の文章の一部や図表を引用し、これを編集する内容とした。

図 3.1 に ILC 全体の配置を示す。<sup>2) 削除</sup>

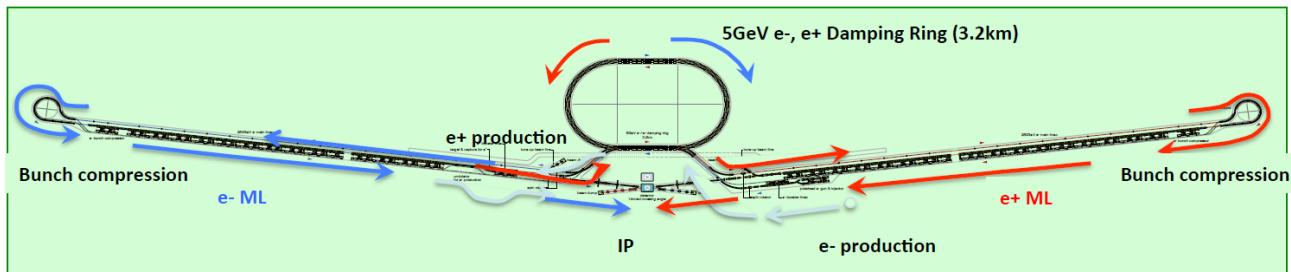


図 3.1 ILC 全体の配置図（減衰リングの周長は約 3.2km、全体の敷地長は約 31km<sup>2)</sup>）<sup>←【山本明様 ILC 概要 文科省有識者会議 平成 26 年 6 月 30 日】</sup>

重心系エネルギー 500 GeV の場合、敷地全長は約 31 km であり、将来的には 50 km に延長する計画 (Super ILC : 重心系エネルギー 1 TeV) がある。リニアコライダーにおけるビーム粒子 (電子、陽電子) の生成から衝突までのプロセスは大まかに次のようなフローで行われる。

それぞれの装置設備の詳細については 3.1～3.9 で説明する。

- ① 電子ビームを生成する。電子ビームはリニアコライダーの利点を生かすよう偏極ビームが要求される。

#### →3.1 電子源

- ② ビームを減衰リングのエネルギー (ILC では 5GeV) まで加速する。

#### →3.3 LTR (Linac Transfer Ring)

- ③ ダンピングリング (Damping Ring) に蓄積してエミッタスを小さくする (電子ビームの高品質化)。これには ILC の場合 100ms あるいは 200ms かかる。

#### →3.4 ダンピングリング

- ④ ダンピングリングから取り出し、線形加速器入口まで運ぶ。この部分のビームラインを RTML (Ring To Main Linac) と云う。

#### →3.5 RTML (Ring To Main Linac)

- ⑤ RTML の最後の部分 (Bunch Compressor) でバンチ (電子ビームの塊り) の長さを短くする。

#### →3.5 RTML (5) BC1 と BC2

- ⑥ 線形加速器 (Main Linac) で加速する。

#### →3.6 超電導加速空洞及び 3.7 クライオモジュール

- ⑦ 陽電子は、衝突点に向かう高エネルギー電子ビームの途中の一部を使って生成される。陽電子ビームは、ダンピングリング及び RTML を経由して陽電子側の線形加速器で加速する。

#### →3.2 陽電子源

- ⑧ ビーム分配系 (BDS - Beam Delivery System) でビームを絞って衝突させる。

#### →3.8 BDS

- ⑨ 電子と陽電子の衝突によって生じる新粒子を測定器で計測する。

#### →3.9 測定器

- ⑩ 最後にビームダンプで使用後のビームを処理する。<sup>1)</sup>

表 3.1 に ILC Technical Design Report (技術設計書) に示された基本仕様を示す。

ダンピングリングから取出した後の電子・陽電子ビームはそれぞれの線型加速器の入口まで、線型加速器と同じトンネル内を長距離輸送 (約 15km) される。上記のプロセスは、5Hz、つまり 200ms の周期で繰返される。減衰リングに蓄積された多数のバンチ (電子・陽電子の塊り) は、約 1ms の時間をかけてひとつひとつ取出されて加速される。従って、200ms のうちの 1ms の間だけビームの電子・陽電子の衝突が起こる<sup>2)</sup>。

表 3.1 ILC の基本仕様<sup>2)</sup>

Parameters	Value
C.M. Energy	500 GeV
Peak luminosity	$1.8 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam Rep. rate	5 Hz
Pulse duration	0.73 ms
Average current	5.8 mA (in pulse)
E gradient in SCRF acc. cavity	31.5 MV/m +/-20% $Q_0 = 1\text{E}10$

### 3.1 電子源

図 3.2 は電子源のビームラインの概念図である<sup>4)</sup>。

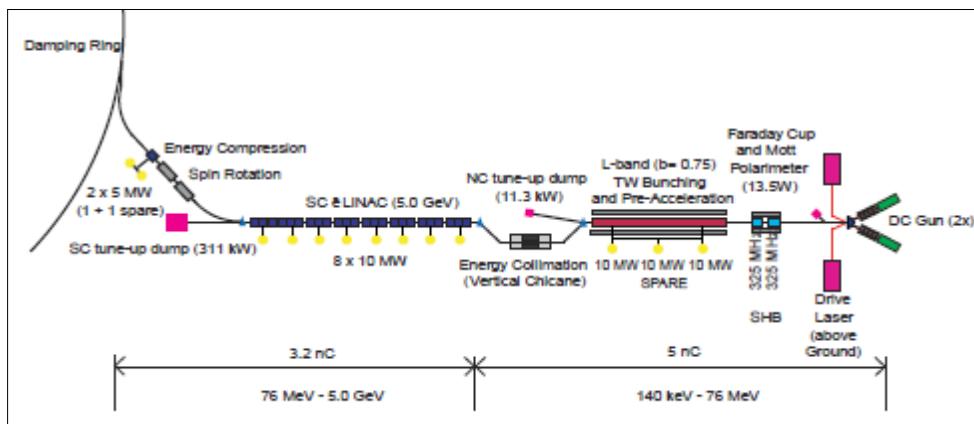


図 3.2 電子源のレイアウト<sup>4)</sup>

電子源で生成されたビームは 76MeV まで常伝導線型加速器で加速され、その後超伝導線型加速器で 5GeV まで加速されてから減衰リングに運ばれる。偏極電子ビームは、歪超格子構造の光陰極 (GaAs/GaAsP) にレーザー光を当てて生成する<sup>1)</sup>。

電子源は上流から、

- ① レーザー駆動直流電子銃
- ② 常伝導前段加速器
- ③ 超伝導 5GeV 加速器
- ④ ダンピングリングへのビームライン (LTR) → 3.3 LTR で説明する。

の 4 つのサブシステムで構成される。

電子源は BDS (Beam Delivery System) の一部とダンピングリングへの入射路の陽電子用の BDS に並行して置かれ、全長約 680m を占めるにすぎない。

- レーザー駆動直流電子銃は、レーザー駆動 200kV 直流電子銃を 2 組設置する。
- 常伝導前段加速器は、電子銃ビームのバンチ長を圧縮する部分である。サービストンネルには 325MHz の高周波電源、1.3GHz 10MW クライストロンとその電源、集束ソレノイド、偏向電磁石用電源等が設置される。
- 超伝導 5GeV 加速器は、ダンピングリングのエネルギーまで加速する部分である。3 台の予備を含む 24 台の標準クライオモジュールから構成される。4 極電磁石は最初の 8 台と、その後は 1 台おきのクライオモジュールに含まれる<sup>3)</sup>。

### 3.2 陽電子源

陽電子源は ILC の最も重大な課題の 1 つである。ILC の陽電子の生成方法として 3 つの候補があり、これらの方法はそれぞれに様々な技術的問題がある。

- アンジュレータ方式 ( $\sim 30\%$  偏極度 (初期)  $\sim 60\%$  偏極度 (増強))
- 電子ビーム駆動のシャワー (無偏極)
- レーザーコンプトン散乱 ( $\sim 60\%$  偏極度)

ILC ではアンジュレータ方式は、偏極陽電子ビームが生成可能であることを最大の理由として基本方式に採用された。しかし、システム的に複雑でありまた新しい方式で信頼性が乏しく、 $100\text{GeV}$  の電子ビームが無いと試験ができないため妥当性の検証が困難である。

従来通りの電子ビームドライブ方式は、偏極陽電子が得られないがターゲットの負荷が高いことを除けば現実的である。

また、レーザーコンプトン方式は課題が多く、1 度の散乱で得られる陽電子が少ないためバンチ重畠は不可欠である<sup>5)</sup>。

ILC の陽電子源は、電子加速器に続く約 1km のアンジュレータ／ドッグレグトンネルと、その下流の BDS トンネル内に設置される。陽電子源の構成及び機能は電子源に比べてより複雑である。

陽電子源は上流から

- アンジュレータ (SC helical undulator)
- 陽電子標的 (Target)
- 陽電子捕獲部 (Capture)
- 常伝導前段加速器 (Pre-accelerator)
- 超伝導 5 GeV 加速器 (SCRF booster)
- LTR

の 6 つのサブシステムで構成される<sup>3)</sup>。図 3.3 を参照されたい。

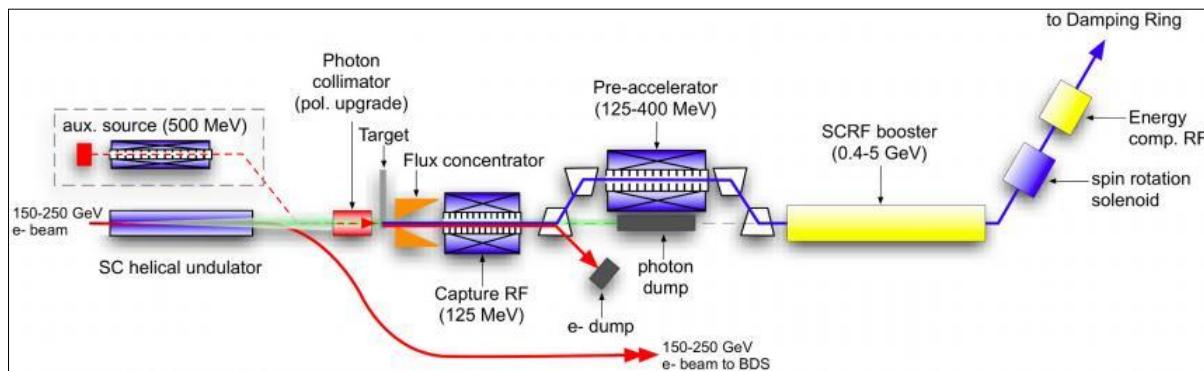


図 3.3 陽電子源のビームライン<sup>4)</sup>

加速が終って衝突点に向かう途中の高エネルギー電子を、アンジュレータに通してガンマ線を発生させる。発生したガンマ線（光子）を標的に当て、 $\gamma \rightarrow e^+e^-$  によって発生する  $e^+$  を集める。

アンジュレータは、軌道を進むにしたがい磁場方向が上下交互に替って電子を蛇行させる磁石である。ILC に使うアンジュレータは、磁場方向が上右下左のように回転するもので、ヘリカルアンジュレータと云う<sup>1)</sup>。

陽電子生成用のガンマ線を出し終えた電子ビームは、陽電子ビームラインと分岐して BDS に導かれ衝突実験に用いられる。

発生したガンマ線はコリメータを通り、 $1.4\text{cm}$  厚のチタン合金の陽電子標的に当てられる。ガン

マ線の平均パワーは最大約 60kW である。このうち標的で吸収されるのは最大約 4kW である。標的を通過したガンマ線はフォトンダンプに捨てられる。標的で発生した陽電子は、ソレノイド磁場で捕獲され 125MeV まで加速される。短パルスガンマ線の熱衝撃破壊を避けるため、標的は巨大な回転ホイールでできている。

陽電子加速器では陽電子のエミッタスが十分小さくなり、4 極電磁石による集束が可能となるには 400MeV の加速エネルギーが必要である。このビームラインは PPA (Positron Source Pre-Accelerator) と呼ばれる。

超伝導 5GeV ブースターは、400MeV から 5 GeV まで加速する。陽電子の集束は以下の 3 段階である。

- 400–1083 MeV ⇒ 標準クライオモジュール 4 台、9 セル空洞 6 台、4 極電磁石 (0.8–2.4T) 6 台
- 1083–2507 MeV ⇒ 標準クライオモジュール 6 台、9 セル空洞 8 台、4 極電磁石 (0.6–1.4T) 2 台
- 2057–5000 MeV ⇒ 標準クライオモジュール 12 台、9 セル空洞 8 台、4 極電磁石 (0.8–1.7T) 1 台  
8 台のクライストロンと電源等がサービストンネルに設置される。

また、陽電子源に設置されるビームダンプは 9 台ある。ダンプの他にコリメータ 16 台、ビームストップ 5 台が設置される<sup>3)</sup>。

### 3.3 LTR (リニアックトランスマーケティング : Linac Transfer Ring)<sup>3)</sup>

LTR は、5GeV ブースターからダンピングリングまでのビーム輸送系である。e<sup>+</sup>LTR は、陽電子ビームの спинを進行方向から垂直方向に変える役割とエネルギー幅を圧縮する役割を担う。e<sup>-</sup>LTR と同様、偏向電磁石、4 極電磁石、スピンドル用の 1 台の 26.2Tm (3.16T × 8.3m) の超伝導ソレノイド、エネルギー圧縮用の 1 台の 12.3m 超伝導加速モジュール等からなる。

### 3.4 ダンピングリング (Damping Ring)<sup>3)</sup>

ダンピングリングは下記の 3 つの役割を持つ。

- 縦、横両方向のエミッタスを小さくする (ビームの集束性を良くする)。
- 縦、横両方向のジッター (波形の時間的な揺らぎ) を小さくする。
- 電子・陽電子源からのビームを遅らせて、パンチ毎のフィードフォワード (出力に変動を起こさせるような外乱を予測し、前もって打ち消してしまう制御方式) を可能にする。

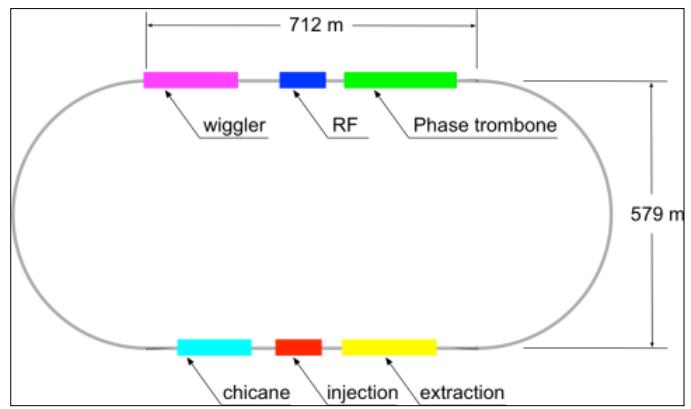


図 3.4 減衰リング全体配置図<sup>4)</sup>

図 3.4 に示すように、電子・陽電子リングは各々運転エネルギー 5GeV、周長 3.2km。レーストラック型で直線部の長さは 712m、対向する 2 つの直線開の距離は 579m。

一つのトンネルに陽電子リング (ビームラインは床面から 900mm)、電子リング (ビームラインは床面から 2200mm) の順に積み重ねて設置される。

BDS 側の直線部には入出部、周長調整用シケインがある。対向直線部にはダンピング時開を短縮するための超伝導ウェイラー、エネルギー補償用の超伝導高周波空洞、ベータトロン位相調整用 4 極電磁石 (phasetrombone) が設置される。その概要は以下のとおり。

#### ● 超伝導ウェイラー

1 リング当たり、実行長 101.25 m (1.875 m × 54 台)、30 cm 周期。スペースとしては 60 台分用意する。

### ● 650MHz 超伝導空洞

1 リング当たり 10 台。クライオモジュールは 1 セル空洞収容の直径 1.5m × 長さ 3.5m。8 台で必要な加速電圧 (14 MV) を供給。2 台予備。ウィグラー上流側に設置される。

### ● 常伝導電磁石及び電源

1 リング当たりの常伝導電磁石及び電源の総数はそれぞれ 2000 台近い。

- 偏向電磁石 4 種類：最大はアーク用の 2940mm 長で 150 台。2 台の電源でアークごとに電流を供給。数が多いのは軌道補正用の 250mm 長の磁石 304 台で、1 台 1 電源。このほか、分散補正用 1940mm 長が 10 台、シケイン用の 940mm 長が 28 台あり、各々まとめて電流が供給される。
- 4 極電磁石：5 種類 841 台、1 台 1 電源。
- 6 極電磁石：1 種類で 600 台、1 台 1 電源。
- キッカー：42 台、セブタム電磁石は 4 台、1 台 1 電源

電源室は直線部両端 4 か所に設置。但し、キッカー電源はキッカ一直近に設置する。

軌道補正用の偏向電磁石、4 極電磁石、6 極電磁石など数で大半 (1700 台以上) を占める電磁石には、リングに沿った 1 本の直流バスライン (水冷) から近くの DC-DC コンバータによって電流を供給する。これによりケーブルによる電力損失を低減する。

### 3.5 RTML (Ring To Main Linac)<sup>3)</sup>

RTML は、減衰リングから ILC 両端の主加速器上流端に至るビーム輸送ラインである。

電子加速器側ビームラインが 17,141m、陽電子加速器側が 15,948m ある。

長さは異なるが、それぞれ以下のようないくつかの機能を有している。

- ビーム輸送と主加速器への幾何学的なビームマッチング。
- ダンピングリングで発生したビームハローを  $10^{-5}$  以下に落とす。
- スピンの向きを垂直から実験に必要な方向に制御。
- ビームのパンチ幅を主加速器での加速に必要な長さまで約 1/20~30 に圧縮。

図 3.5 にその全体の形状を示す。



図 3.5 RTML 全体図（電子の E が頭文字、陽電子側も殆ど同じ）<sup>4)</sup>

また、RTML にはビーム計測システム、フィードバック／フィードフォワードシステムが設置され、ビーム品質の維持に利用される。

RTML のビームラインは上流から、①RTL (Ring to Linac)、②LTL (Long Transfer Line)、③TURN (Turn-around beamline)、④SPIN (Spin-rotation system)、⑤BC1 (Bunch Compressor 1)、⑥BC2 (Bunch Compressor 2) の 6 区域で構成される。その概要は以下のとおり。

なお、LTL は主加速器に平行する長い輸送路である。ダンピングリングと BC1、BC2 の下流には調整用のビームダンプが設置される<sup>3)</sup>。

#### ① RTL と②LTL<sup>3)</sup>

主加速器ビームラインを標高 (EL) ± 0 mm とすると、LTL は EL1650 mm に設置される。

ダンピングリングの電子ビームラインは LTL と同じ EL1650 mm であるが、陽電子ビームラインは EL350 mm である。従って、陽電子 RTL では垂直方向の dogleg 型ビームラインでビームラインを 350 mm から 1650 mm に上げている。

因みに、主加速器、BDS の床面は EL1100 mm、ダンピングリングの床面は EL550 mmである。また、主加速器のビームラインや LTL は真直ではなく EL 一定の曲線（地球の曲率）である。

### ③ TURN<sup>3)</sup>

オフセットした RTML のビームラインを ML に合わせるための水平、垂直の dogleg 型ビームラインに繞いて、回転半径約 30m の Turnaround 偏向電磁石システムが設置される。

### ④ SPIN

偏向角 7.9° の偏向電磁石の上下流に 5 T の超伝導ソレノイドコイルを 2 台ずつ伴ったシステム<sup>3)</sup>。

減衰リングで上下向きであった電子・陽電子のスピンの向きを、衝突実験のために任意の方向に向けられるようにスピンを回転する装置である。肝心な部分は、5Tesla の超伝導ソレノイド磁石、偏向角度 7.9 度の偏向磁石および同じソレノイド磁石もう一台からなる（実際は軌道補正のため各ソレノイド磁石は 2 つにわけられその間に 4 極磁石が挿入される）。ソレノイド磁石の磁場の強さを変えることでスピンの向きを自由に変えられる。

### ● Feedforward

上流で何らかの原因で生じたバンチの位置（上下左右）の誤差を、バンチごとに補正する装置。ビームライン ELTL の終端（図 3.5 の左端）に設置した位置検出器でバンチの位置を検出し、そのデーターをすぐ隣にある ESPN の終端に送り、円弧 ETURN を周回してきたそのバンチを蹴って修正する。これによって、例えは減衰リングの取出しキッカーの誤差を補正できる。

### ⑤ BC1 と⑥ BC2

RTML のなかで最も重要な部分はバンチ長圧縮器である。1.3GHz のリナックの正弦波でバンチ全体を十分に一様に加速するためには、バンチの長さ（標準偏差）が波長 23cm の 1/150 程度以下（1.5mm）でなければならない。

BC1 でバンチ幅が 6 mm から 0.9 mm に圧縮される（エネルギーは 5 ± 0.0055GeV から 4.8 ± 0.068GeV になる）。BC1 は 1 組の標準型 RF ユニットからなる。但し、クライオモジュール 3 台は 8 空洞と 1 台の 4 極電磁石で構成される<sup>3)</sup>。

BC2 でバンチ幅が 0.9 mm から 0.3 mm に圧縮される（エネルギーは 14.9 ± 0.17 GeV になる）。BC2 は 16 組の標準型 RF ユニットからなる。クライオモジュールは 3 台毎に 1 台の 4 極電磁石で構成される<sup>3)</sup>。

それぞれ、RF ユニットの下流に 150m の常伝導ウィグラー電磁石が設置される<sup>3)</sup>。

## 3. 6 超電導加速空洞

ILC で採用する加速空洞を図 3.6 に示す。1.3GHz の 9 セルからなる空洞で、ドイツの DESY 研究所で TESLA 計画のために長年開発してきた形状である。

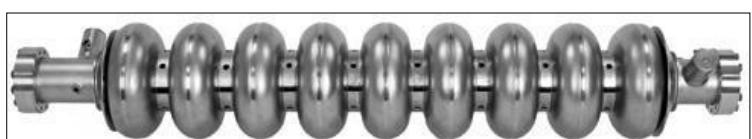


図 3.6 加速空洞の外観<sup>1)</sup>

一つのセルの長さは 1.3GHz の波長の半分の 11.5cm であり 9 セルでほぼ 1m になる。両端部も含めると約 1.3m、材質は厚さ約 3 mm のニオブ。

縦測定の加速勾配は、35MV/m で  $0.8 \times 10^{10}$  以上、31.5 MV/m で  $1 \times 10^{10}$  以上とする。平均加速勾配を 20% の幅を持たせる。つまり 25.2 MV/m 以上で 37.8 MV/m 以下（この上限は、ここまで加速勾配を出せるようなマイクロ波源を用意すると云う意味）となる。

1 台の空洞の実効長は 1.036m、1 台による加速は  $1.036 \times 31.5 = 32.6$  MV、電子・陽電子合計 500GeV に達するにはこのような空洞が 16,024 台必要ということになる。

空洞は本体（9つのセル）のほかに、マイクロ波を入力する部分（power coupler、図3.7の右端）、ビームが発生する電磁波を吸収する部分（HOM coupler、図3.7の両端）などを含み、さらにチタン製容器の中に入れて、空洞のまわりを液体ヘリウムで満たす<sup>1)</sup>。

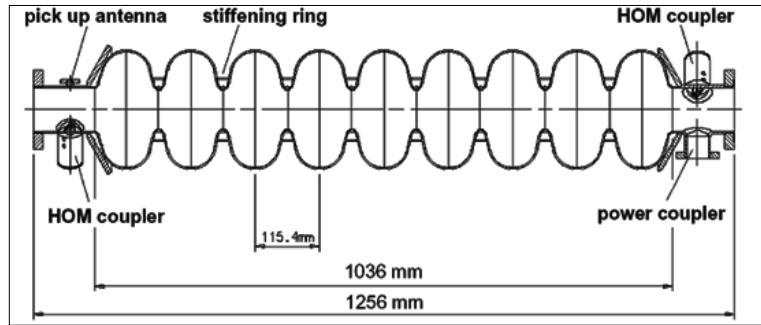


図3.7 加速空洞の断面図<sup>1)</sup>

なお、製造技術と製造法については4章において詳細説明をする。

### (1) 入力結合器（インプットカップラー）<sup>6)</sup>

入力結合器は、高周波源からの高周波電力を高周波空洞とビームに供給するために用いられる重要な機器である。超伝導空洞では、空間的な制約や熱侵入を抑制する観点から、同軸型構造（図3.8）が適しており、空洞からの反射高周波電力を最小限に低くするために、空洞とビーム負荷を合わせた結合条件に整合させることが重要である。ビーム電流の変化を伴う運転では、結合度を可変とする機構が必要となる。入力結合器は、超伝導高周波空洞システムの中でも重要な構成品の一つであり、なかでもセラミックスを用いる高周波窓は、高い信頼性が要求される部品である。入力結合器は、その設計・製造、コンディショニング、運転などにおいて、種々の重要な技術的要素を含んでいる。

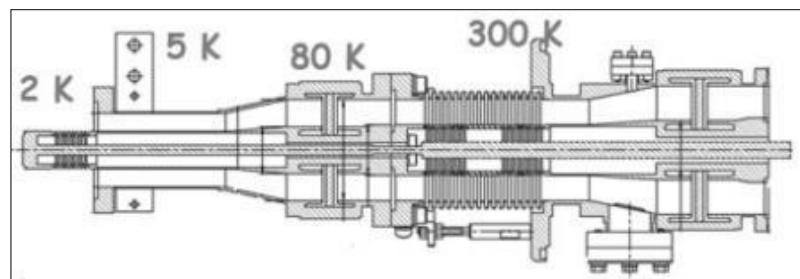


図3.8 入力結合器（インプットカップラー）<sup>6)</sup>

### (2) 高調波結合器（HOM カップラー）<sup>6)</sup>

ビームが空洞内を通過するとき、高調波モードが誘起される。空洞内に励起された高調波モードは、空洞内を通過する次のビームに多大な影響を与える。この高調波モードを十分に減衰することができないときには、ビーム不安定性やビーム損失を導く可能性が高くなる。また、高調波モードの増大はビームの強度や品質を悪化し、さらに余計な空洞損失により冷凍機負荷を増やす結果となる。ビーム電流が小さい場合には、アンテナ結合型のカップラーで対応できるが、ビーム電流が大きくなると高調波電力も大きくなり、高い周波数成分まで減衰する必要があるため、ビームパイプに高調波吸収体を取り付けることが適切である。

HOM カップラーの種類としては、図3.9に示す同軸アンテナ型 HOM カップラー、導波管型 HOM カップラー、HOM 吸収体ダンパーの3タイプがあり、現在も研究開発が行われている。

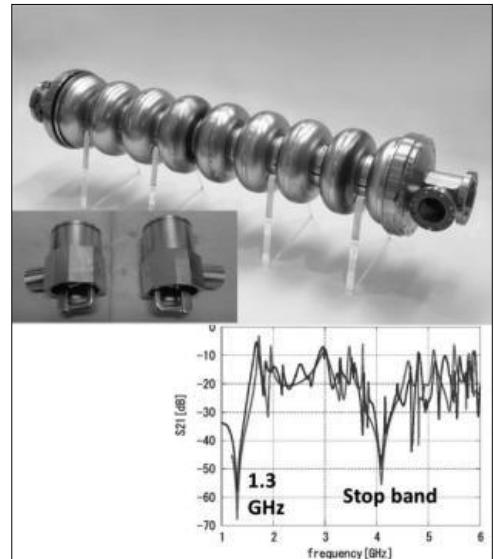


図3.9 同軸アンテナ型 HOM カップラー<sup>6)</sup>

### (3) 周波数チューナー<sup>6)</sup>

超伝導空洞の共振周波数は、励振する高周波源の周波数に一致させなくてはならない。この周波数の調整は、空洞の弾性変形範囲内で空洞全長を伸縮させることで行われる。超伝導空洞の共振周波数の半値バンド幅は、入力結合器の外部Q値に依存して決まっており、数10～数kHz程度であり、この周波数範囲内を安定に制御できることが重要である。

ヘリウムジャケット内部の圧力変動、空洞内電・磁界応力による空洞形状の変形、外部より励振される機械振動、マイクロフォニクスなどの微細振動などのいくつかの要因が、空洞の共振周波数の安定性に影響を与える。また、運転時に反射電力を低減して、入射高周波電の効率を最大限に高めるために、ピエゾ素子を用いた高速でのフィードバックによる精密な制御が必要となる(図3.10)。

周波数チューナーの故障時には、交換できるようにステッピングモーターはクライオモジュールの外部に設置し、ピエゾ素子は容易に交換可能な構造としてアクセス用ポートを用意しておくことが望ましい。

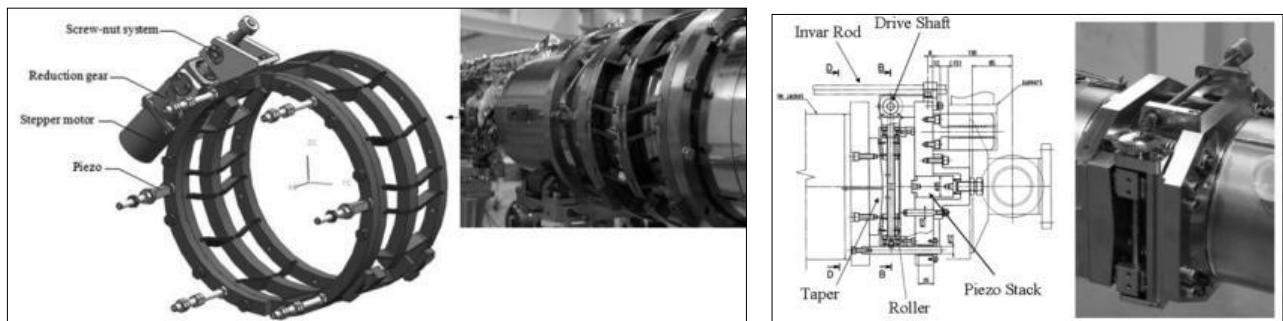


図3.10 Blade Tuner (左) と Slide-Jack Tuner (右)<sup>6)</sup>

### 3.7 クライオモジュール

主加速器は31.5MeV/mの加速勾配を持つ1.3GHzの9セル超伝導加速空洞(全長約1m)を直線的に並べて出来ている。複数の空洞を2Kの液体ヘリウムで満たされた容器(クライオスタット)に収容した加速器をクライオモジュールと呼ぶ。クライオモジュールの構造が図3.11及び図3.12である。

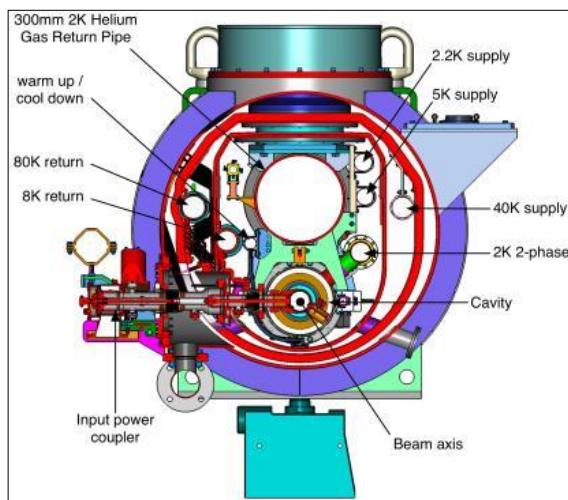


図3.11 クライオモジュールの断面<sup>4)</sup>

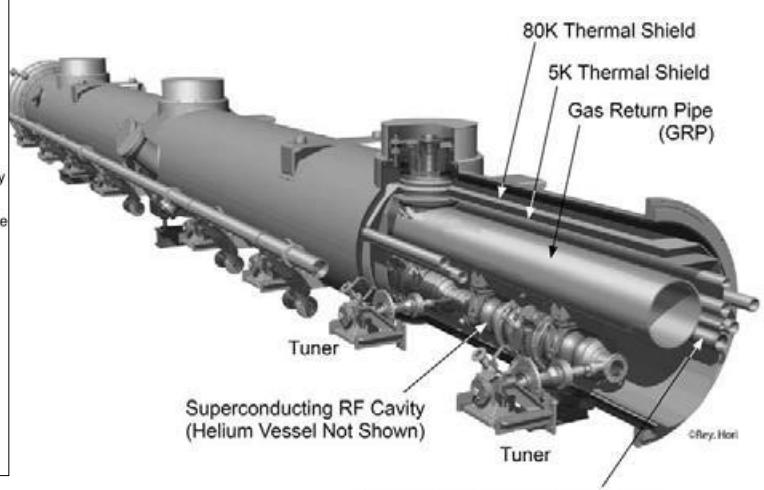


図3.12 クライオモジュールの構造<sup>7)</sup>

ヘリウム容器の付いた空洞は、GRP(Gas Return Pipe)と呼ばれるステンレス鋼の配管( $\phi 300\text{ mm}$ )に吊り下げられ、4.5Kの液体ヘリウムで冷却された5K熱放射遮へいと40Kのヘリウムガスで冷却

された 80K 热放射遮へいで囲われている。热放射遮蔽はアルミニウムで出来ており、各热放射遮蔽に热接触しているアルミニウム管に液体ヘリウムおよびヘリウムガスを流して冷却している。KEK の研究用クライオモジュールでは、80K 热放射遮へいを 40K のヘリウムガスではなく、77K の液体窒素で冷却している。

クライオモジュールの断熱真空槽と 80K 热放射遮蔽、80K 热放射遮蔽と 5K 热放射遮蔽、それに 5K 热放射遮蔽とヘリウム容器の間には、それぞれスーパーインシュレーションを設けて、热放射による热侵入を減らしている。また、クライオモジュール内は真空ポンプで真空を保ち、対流による热侵入を防いでいる。

リニアコライダーでは电子あるいは阳电子を確實に加速するため、ビームラインと呼ばれる電子あるいは阳电子が飛ぶ軌道を 1 本の直線状に保持する必要がある。そのために、クライオモジュール内に設置されている 9 台ないし 8 台の超伝導高周波加速空洞も、ガス回収パイプに吊り下げる前後で 1 本の直線上に並ぶように調整（アライメント、alignment）する必要がある。また、空洞やガス回収パイプなどは、室温から 2K まで冷却される間に热収縮と呼ばれる形状の変化を起こす。各空洞に高周波電力を供給するために、入力結合器と呼ばれる機器を室温部から空洞まで挿入して空洞と接続する必要があるが、この热収縮によって入力結合器の室温部分と空洞との接続部で位置のずれが生じてしまう。そこで、インバー（Invar；不变鋼）と呼ばれる热収縮の小さい合金の棒でガス回収パイプの中心からの各空洞間の位置を固定し、热収縮で入力結合器が壊れないようにしてある<sup>7)</sup>。

### (1) サポートポスト<sup>7)</sup>

超伝導高周波加速空洞とそれを吊り下げるガス回収パイプ、5K および 80K 热放射遮蔽は、サポートポストと呼ばれる特殊な構造をした支柱でクライオモジュールの断熱真空槽に取付けられる。

空洞やガス回収パイプなどの機器の荷重を支えるのはガラス繊維強化プラスチック G-10（ガラス布 エポキシ樹脂 積層板）の円筒で、断熱真空槽とガス回収パイプ、それぞれと接続するためのステンレス鋼の板、5K および 80K の热放射遮蔽を取り付けるためのアルミニウム板が冷やし嵌めによって G-10 の円筒に固定されている。G-10 の円筒内部にもそれぞれの板に対応した円板が取付けられており、内部の円板間にもスーパーインシュレーションが設置されている（図 3.13）。

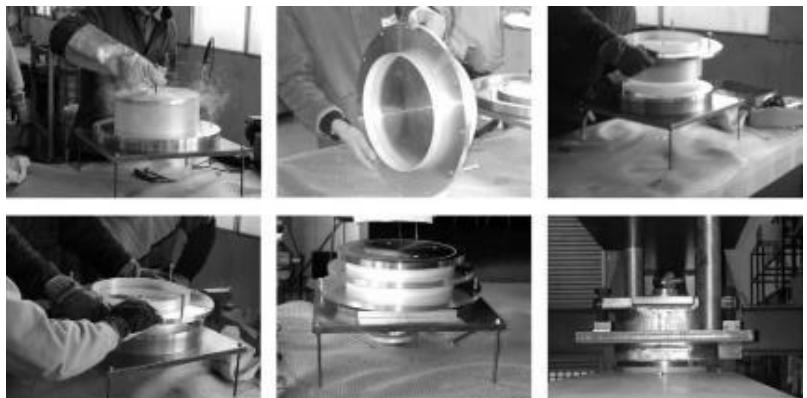


図 3.13 サポートポストの組立<sup>7)</sup>

リニアコライダーでは 1 台のクライオモジュールの長さが 12.6m、3 台のサポートポストで空洞やガス回収パイプ、2 つの热放射遮へいを断熱真空槽から吊り下げている。前述のように、冷却による热収縮でガス回収パイプなどが変形するため、中央部に取付けられたサポートポストは断熱真空槽に固定されているが、他の 2 台のサポートポストは、ビームライン方向に動けるような構造になっている。

### (2) 主加速ユニット (ML unit)

ILC 主加速器のクライオモジュールには 2 種類ある（図 3.14）。9 台の加速空洞を収容した TypeA と 8 台の加速空洞の中央に 4 極電磁石を配した TypeB。クライオモジュールの全長は いずれも 12.652m。3 台のクライオモジュールを TypeA - TypeB - TypeA のように並べたものを主加速器の加速ユニット

「ML unit」と云う。ML unit の長さは 37.956m。日本サイトにおける主加速器 RF 源は DKS 方式と呼ばれ、3 台の ML unit に対して 2 台の 10MW クライストロンで RF を供給する。ルミノシティ増強オプションでは ML unit とクライストロンは 1 対 1 となる。

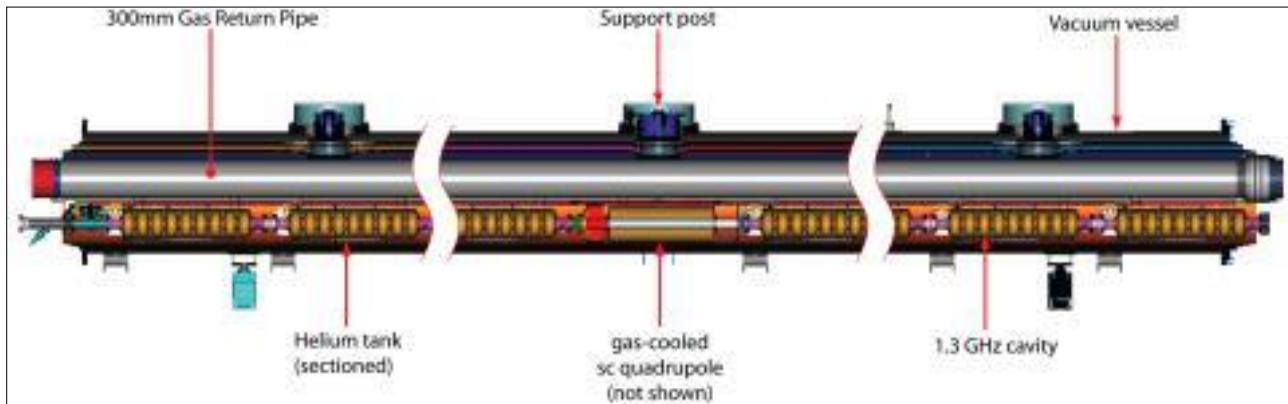


図 3.14 ML unit (TypeA -TypeB -TypeA)<sup>4)</sup>

ML unit を 4 基連結し、最後に 2.5m 長の cold-box を付けたものは、クライオストリング (Cryo-string) と呼ばれ加速空洞の最小の冷凍単位である。クライオストリングを 13 基連結したものの (ML unit 52 基 : クライオモジュール 156 台) をクライオユニット (Cryo-unit) と呼び (図 3.15)、トンネル内 5km 每に設置する 5MW の冷凍プラント (図 3.16) で 2K に冷却する<sup>3)</sup>。

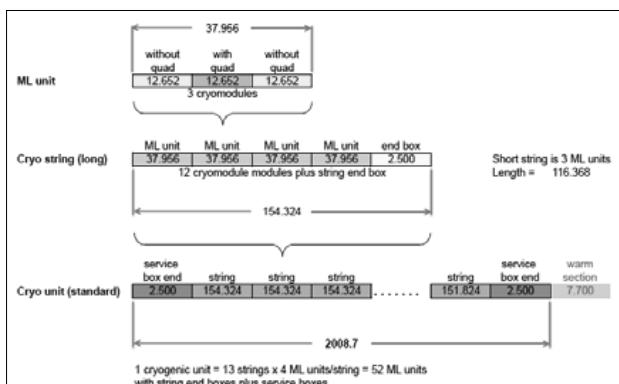


図 3.15 Cryo-String と Cryo-Unit<sup>3)</sup>

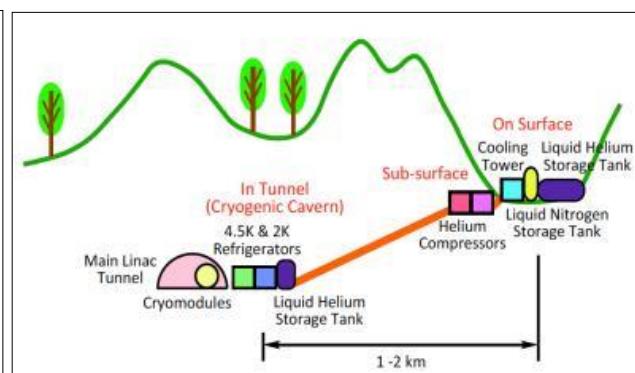


図 3.16 5MW 冷凍プラントの配置<sup>4)</sup>

なお、クライオモジュール総数は 1,855 台、TypeA 1,182 台、TypeB 673 台である。

### (3) 液面計<sup>7)</sup>

クライオモジュール 12 台つなげたものをクライオストリングと云うが、最後のクライオモジュールでは、図 3.16 に示すように端部で二相ヘリウム供給配管がガス回収パイプに接続されている。

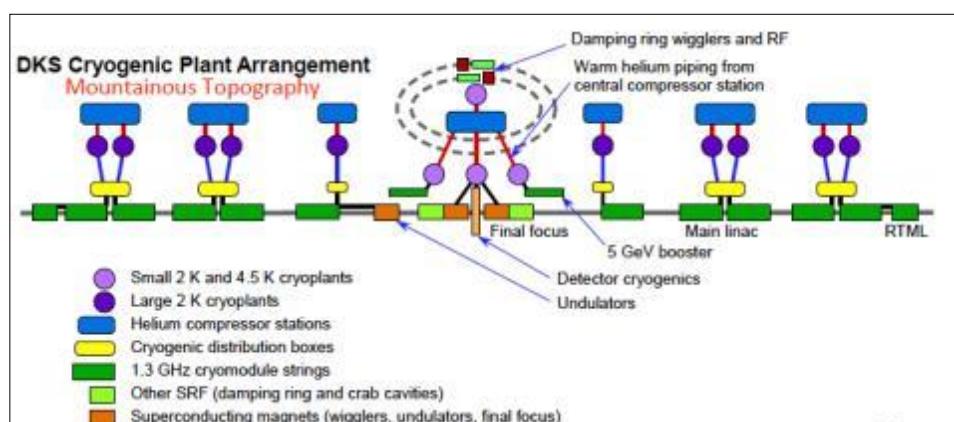


図 3.17 ILC 主線形加速器の冷却システム<sup>4)</sup>

最後のクライオモジュールまで超流動ヘリウムが供給されているか否かを確認するために、供給配管と回収パイプの間に超伝導液面計を設置するためのポートが取付けられている（図 3.17）。

超伝導液面計は、1 本の超伝導線（NbTi 合金など）が液体ヘリウムに浸っている部分だけが超伝導状態になって電気抵抗が実質的に 0 になること用いたものである。液面計全体が液体ヘリウムに浸かっていない場合の超伝導線の電気抵抗と、液体ヘリウムに浸かっている部分の電気抵抗が 0 になって、全体の抵抗が減少した割合から、超伝導線のどの位置迄液体ヘリウムに浸かっているか（絶対長さ、または、全体の長さに対する百分率）を検出できる。クライオモジュール内の液面計の位置を予め測定しておけば、液面計の出力からクライオモジュール内の液体ヘリウムの高さが分かる。

（図 3.18）

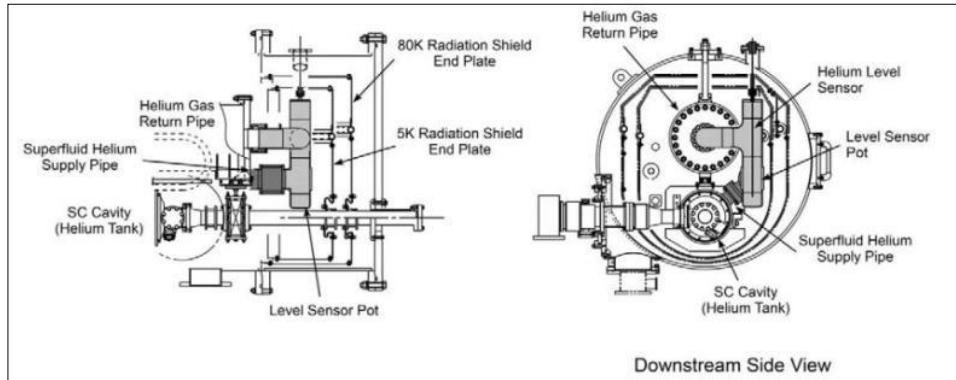


図 3.18 ヘリウム液面計ポート<sup>7)</sup>

#### (4) トランファーライン<sup>7)</sup>

超伝導高周波加速空洞を 2K に冷却するためには、図 3.19 のヘリウム冷却システムの概要図に示すように、通常のヘリウム液化冷凍機で液体ヘリウムを生成する。ヘリウム液化冷凍機はカタログ製品として市販されているが、2014 年 9 月現在で、ヘリウム液化冷凍機を製造・販売している会社は世界で 2 社しかない。2K ヘリウム冷却システムでは、2 種類のヘリウム冷凍機を用いるため、このヘリウム冷凍機を 4.5K ヘリウム冷凍機と呼ぶ。4.5K ヘリウム冷凍機からは 4.5K の液体ヘリウムのほかに、クライオモジュールの 80K 熱放射遮蔽の冷却に使用する 40K のヘリウムガスも生成する。

4.5K ヘリウム液化冷凍機で生成した液体ヘリウムは、2K ヘリウム冷凍機に送られて 2K の超流動ヘリウムの生成に用いられるほか、クライオモジュールの 5K 熱放射遮蔽の冷却にも使用する。2K ヘリウム冷凍機で生成した 2K 超流動ヘリウムはクライオモジュールの二相ヘリウム供給配管を経由して、超伝導高周波加速空洞のヘリウム容器へ供給され、空洞の温度を 2K に保つ。

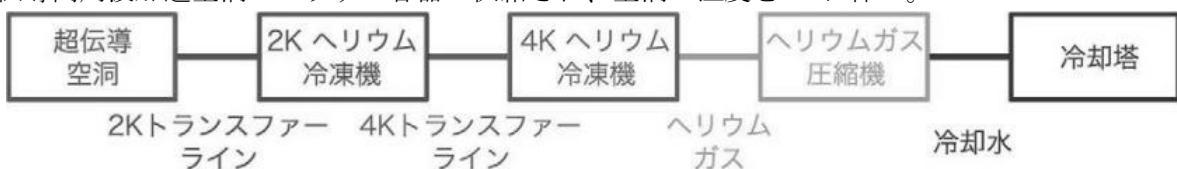


図 3.19 ヘリウム冷却システムの概要<sup>7)</sup>

液化したヘリウムや液体窒素をクライオモジュールに供給するためには、クライオモジュールまでの途中の配管内でできるだけ外部からの侵入熱による蒸発を防がなければならない。そのためには、クライオモジュールと同じように、3 つのモードによる伝熱を減らす構造を持った特別な配管が必要となる。この低温流体用の配管をトランシスフーライン（transfer line）と呼ぶ。

図 3.20 に液体ヘリウムと液体窒素を 1 本の多重配管で供給するトランシスフーラインの断面の一例を示す。

トランスマルチライン内は断熱のため、真空に保たれている。液体ヘリウムや液体窒素が流れる内部の配管は薄肉になっており、熱伝導による伝熱面積を減らしている。また、内部の配管の位置を保持するための支持部品は、ガラス繊維強化プラスチックなどの熱伝導率の低い材料を用いている。さらに、80Kの熱放射遮蔽を採用し、熱放射遮蔽の冷却には液体窒素を用いている。

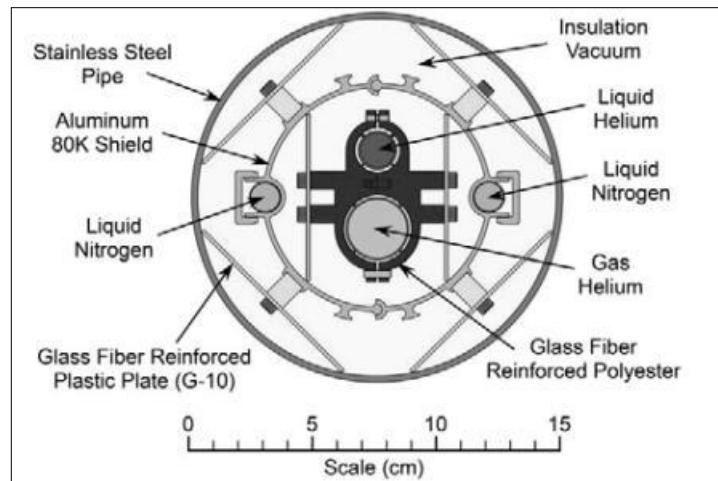


図3.20 多重管トランスマルチライン<sup>7)</sup>

### 3.8 ビームデリバリーシステム (BDS : Beam Delivery System)<sup>1)</sup>

電子加速器側は陽電子生成用アンジュレータビームラインの出口から衝突点、陽電子加速器側は主加速器出口から衝突点までのビームライン(夫々2.2km)をBDS(Beam Delivery System)と呼ぶ。全長は約2250m。電子ビームラインと陽電子ビームラインは14mrad(約0.8°)の角度で交差している。ビームラインは主加速器と異なり真直「レーザーストレート」である。

BDSの心臓部はビームを絞るシステム最終収束系FFS(Final Focus System)である。これは衝突点両側各700mくらいを占める電磁石の列である。ビームを絞るにはレンズの働きをする4極電磁石を用いれば良いが、これには色収差の問題がある。光のレンズの場合、光の色によって屈折率が異なるので単純な1枚のレンズでは色によって焦点が異なり、全体としてボケる。4極電磁石でも同じでビーム中のやや高いエネルギーの粒子と低いエネルギーの粒子では焦点の位置が異なる。

色収差は円型加速器でもあり、エネルギーの高い粒子ほど外側を回る。6極磁石の磁場は粒子のエネルギーによって異なる点を通ることになる。4極磁石のすぐそばに6極電磁石を置いてその磁場を調整すれば、4極電磁石・6極電磁石の組で色収差が補正できる。

リニアコライダーの場合は、もともと軌道が直線なのでエネルギーによる軌道差はない。これをつくるために、偏向電磁石を使って軌道を曲げる。リニアコライダーでは極めて精密な補正が必要なので、高級カメラが10枚

以上の多数のレンズからなるように、最終収束系は偏向電磁石・4極電磁石・6極電磁石の多数の組合せ

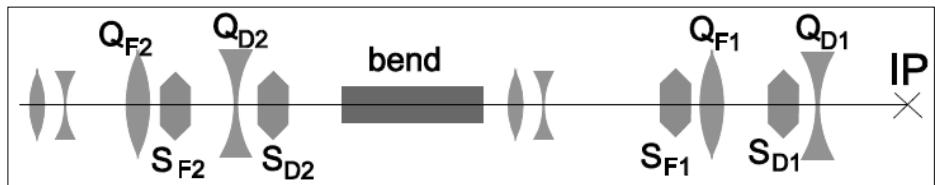


図3.21 最終収束系の原理<sup>1)</sup>

である。その原理を図3.21に模式的に示す。Qは4極電磁石、Sは6極電磁石、bendは偏向電磁石で、右端が衝突点IP(Impact Point)である。右側の2つの6極電磁石は、最後の2つの4極電磁石が作る色収差を消す。一方、6極電磁石がビームに与える力は非線形なので、これにより高次の非線形収差を生じる。これを消すのが、左側の6極電磁石と4極電磁石の組である。

BDSの主要部は最終収束系であるが、全長がその3倍もあることから解かるように、下記の様に非常に多くの部分からなる。

- MPS (Machine Protection System、加速器保護システム) →(1)
- ビーム診断装置群 (ビームエネルギー、エミッタス、偏極度などの測定)
- コリメータ (x-y面でのコリメーション、エネルギーコリメーション) →(2)
- ミュー粒子遮蔽壁

- クラブ空洞 →(3)
- FFS (Final Focus System、最終収束系)
- 衝突点 (IP) フィードバックシステム →(4)

### (1) MPS (Machine Protection System)

メインライナックはビームパイプの口径が大きく (70mm) ある程度エネルギーのずれたビームでも通してしまうが、BDS はエネルギー差に敏感で、エネルギーの大きくずれたビームは途中の電磁石の破損や検出器に損害をあたえる可能性がある。そのようなビームをはじき出すのが MPS である。

### (2) コリメータ

ビームは中心から大きくはずれた粒子 (ハロー) も、ごく僅かであるが不可避的に含む。それらは 4 極電磁石内よりシンクロトロン輻射を出し、それが検出器に入って実験を阻害する。ハロー粒子を止めるために、長いコリメータが挿入される。

### (3) クラブ空洞

ビームは正面衝突するように述べたが、実はそれでは衝突で発生する種々のゴミがまわりの磁石に当たって、大量の background になる。そこで、ILC では 14mrad の交差角をつけて衝突させ、ゴミと入射ビームを分離できるようにしている。

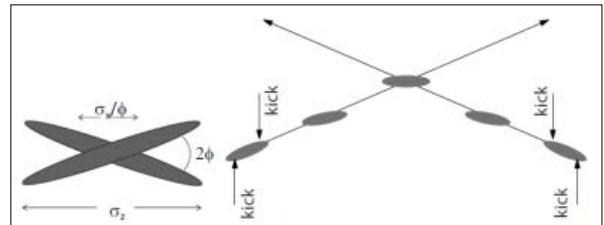


図 3.22 クラブ交差<sup>1)</sup>

図 3.22 に示すように、衝突前にビーム先端と後端を逆方向に蹴り衝突点に到達するときには、正面衝突の形になる様にする。これをクラブ交差と云うがクラブは蟹の意味である。

### (4) 衝突点 (IP) フィードバックシステム

IP (衝突点) での上下方向のビームサイズは数nmであり、ビーム位置のわずかな振動でもルミノシティが落ちる。そこで、両ビームの位置のずれをバンチごとに計測し、後続のバンチの位置を補正する。超伝導コライダーの利点の一つはバンチ間隔が広いことである。ILC では 300-500ns (常伝導コライダーでは 1ns であり、従って Digital 回路により補正をする時間の余裕がある) 図 3.23 はその概念図である。

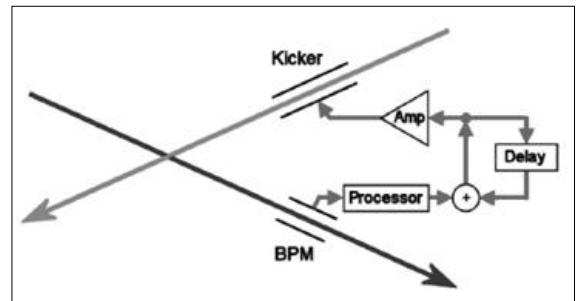


図 3.23 IP フィードバックの概念図<sup>1)</sup>

### (5) ビームダンプライン

衝突したビームは大きな分散角とエネルギー幅を持つ。高エネルギーフォトンも発生する。従って幾何学的及びエネルギーアクセプタンスが大きなダンプラインが必要。ダンプライン上流には ビーム診断システムが設置され、上流 2 台の 4 極電磁石は超伝導である。

### (6) ビームダンプ

ビームダンプは全システムに多数あるが、最も大きなものは 4 か所あり (BDS 直前、衝突後の各 2 つ)、いずれも 1TeV 増強時を見越して最大 18MW のビームを処理できるようになっている。これは、高压水を格納した直径 1.8m × 長さ 11m のステンレス容器である。高压 (10 気圧) にするのは沸点を上げるためにある。ビームの入る窓は、直径 30 cm、厚さ 1 mm のチタン製である。ビームはパルス継

続時間 1ms の間、半径 6cm の円を描くようにスワイープされ一点に集中しないようにする。計算上水温は最高 155°Cまで上がる。

### 3.9 測定器<sup>3)</sup>

SiD と ILD、2 台のディテクタが交互に実験を行う「プッシュプル」方式で実験。ディテクタは可動プラットフォーム上に設置され 6 時間以内に移動を完了する。ビームラインへの設置精度は 1 mm 以下とする。プラットフォームは数 10 nm の振動安定度が必要である。

(図 3.24)

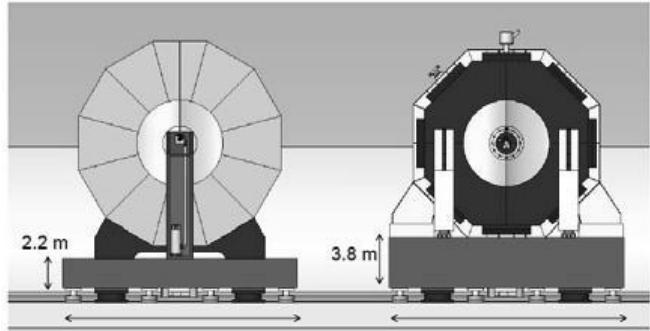


図 3.24 ILD (左) と SiD (右)<sup>3)</sup>

#### (1) SiD

Barrel 部が 4160t、Endcap が 2450t × 2 個、合計 9060t の重量がある。プラットフォームは高さ 3.8m、床面積が約 20m × 20m 必要である。プラットフォームが鉄筋入りのコンクリートと仮定すると重量は 4500t。ディテクターホールへの負荷は約 14000t を考慮する必要がある。

#### (2) ILD

2 つの Endcap と 3 分割された Barrel から構成される。Barrel の重量は 3500t × 3 である。ディテクタの組立方は実験ホールへのアクセスの仕方で異なる。LHC のように立坑でアクセスする場合には地上のアセンブリーホールで 5 分割された検出器を組立、試験したのち実験室に降ろして、最終組立を行う。この時 3500t 以上のクレーンが必要となる。アクセスが斜坑の場合は 1km 程度のトンネルをトラックで運搬することになる。この場合、大部分の部品はアセンブリーホールで組み立てことになるが、トラックの重量制限から、ヨークは分割して運搬し実験ホールで組み立てことになる。地上から運び込まなければならない部品の最大サイズは超伝導ソレノイドの直径 8.7m で搬入トンネルのサイズが決められることになる。

なお、日本は主に ILD の設計活動に参画。

### 3.10 ILC の高周波源<sup>8)</sup>

超伝導加速空洞を用いる線形加速器では、その RF パルス幅はミリ秒オーダーの長さとなり、多数のバンチ構造を持つ大電流を加速するものとなる。ILC の高周波系は、10MW マルチビームクライストロン (MBK) を高周波源として、その RF 出力を複数台の超伝導加速空洞へ供給する。1 台の MBK で 39 台の空洞をドライブする。線形加速器トンネル内全体に渡って 436 台の MBK と変調器を配置する。かまぼこ型トンネルはシールド壁で隔てられており、加速器が運転中でも高周波系へアクセスが可能となっている。

### 3.11 電磁石と電源

ILC では約 5,000 台の電磁石が使用され、全てのステップにおける電子・陽電子ビーム粒子の制御を担う重要な要素である。加速器においてビーム輸送を行うために不可欠な磁場は、常伝導電磁石や超伝導電磁石、永久磁石を必要に応じて選択し、磁極の形状や印加する電流パターンを工夫することによって生成される。

#### (1) 電磁石<sup>9)</sup>

荷電粒子が磁場によるローレンツ力を受けることを利用し、加速器において加速対象の荷電粒子群(ビーム)を制御するために、電磁石が主に用いられている。加速器で用いられる電磁石には以下のものがある。

### ①偏振電磁石（図 3.25）

ビーム軌道を曲げるために使用する。ビーム進行方向に対して垂直で一様な磁場を発生させる。線形加速器においては運動量や Charge to mass ratio に応じた選別等に使用され、円形加速器ではビーム閉軌道の生成に用いられる。

光学系のプリズムに相当する。

### ②四極電磁石（図 3.26）

ビームの収束に使用する。光学系の凹レンズと同じ役割を果たすが、四極電磁石 1 台では水平、垂直方向それぞれに逆のレンズとして働くため、2 台以上を組み合わせて使用する。



図 3.25 偏向電磁石<sup>10)</sup>



図 3.26 四極電磁石<sup>10)</sup>



図 3.27 六極電磁石<sup>10)</sup>

### ③六極電磁石（図 3.27）

ビームの運動量差に伴う閉軌道のズレや焦点位置のズレの補正に使用する。これらのズレは光学系で色収差とよばれるものと同じものである。運動量の差によって同じ磁場でも受けるローレンツ力が異なることで、閉軌道や焦点位置が運動量によって異なることを補正する

### ④補正電磁石

偏向電磁石や四極電磁石の磁場の不完全性(磁極の製作誤差や磁石の設置アライメント誤差等)に伴うビーム軌道のズレの補正に使用する。六極電磁石もこれに含まれる。小型の偏向電磁石であるステアリング電磁石や、45 度回転したスキューリー四極電磁石等がある。

### ⑤その他の電磁石

偏向電磁石と四極電磁石の両方の磁場を生成する機能結合型電磁石、八極電磁石やそれ以上の多極電磁石、ビーム入出射時に使用するキッカーエマグネットやセプタム電磁石等がある。

## (2) 電磁石の配線<sup>9)</sup>

電磁石への電力の供給には電線が用いられる。取り回しや絶縁のとりやすさから、導体が絶縁体で覆われた絶縁電線がよく用いられる。絶縁体にはポリエチレンやビニルが用いられる。交流や直流の電圧は省令により次の 3 つに分類される。

- ① 低圧：直流 750V 以下、交流 600V 以下
- ② 高圧：直流 750V を超える。交流 600V を超え、7000V 以下
- ③ 特別高圧：7000V を超える

電線の最も大きな需要は交流の送電線であるため、電線の定格電圧も 600V、3300V、6600V という交流電圧表示をされていることが多い。図 3.28 にケーブルの構造を示す。シースがあるものをケーブル、無い物を電線と呼ぶ。中心の導体は一般的に軟銅線が用いられる。場合によっては無酸素銅、銀やスズとの銅合金、メッキ線、アルミ導体なども使われることがある。導体の周りにはポリエチレンやビニルの絶縁体があり、さらにその周りをシース(外皮)で覆っている。シースには絶縁体と同じ塩化ビニル混和物やポリエチレン、架橋ポリエチ

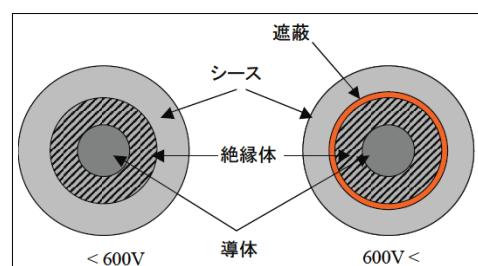


図 3.28 ケーブルの模式図<sup>9)</sup>

レンが用いられる。

600V を超える場合、絶縁体とシースの間に遮蔽層がある。遮蔽層には銅テープや銅編組が用いられ、遮蔽層は接地点に接続することで導体周りの境界条件を一定にする役割がある。遮蔽層がない場合、電線周辺に尖った導体があるとそこと銅線の間に電場が集中し、絶縁体が発熱する場合がある。

### (3) 電磁石の電源<sup>9)</sup>

加速器用の電磁石電源としてはその用途に応じて様々なものが存在する。DC 出力の電源や、μ秒オーダーの性能を要求されるパルス電源、数 Hz～数十 Hz の周期でパターン出力が要求される共振電源等である。出力する電力にしても、高電圧低電流から、低電圧高電流、高電圧高電流まで幅広い。

電源とは電気エネルギーの形態を変化させる物であるとも言える。これを電力変換といい、交流(AC)と直流(DC)の組み合わせを考えると 4 通り存在する。それぞれに名称があり、表 3.2 に示したようになる。ここでは大電力の変換器でよく用いられる名称のみを記した。加速器の電磁石電源としては AC-DC 変換器(整流器)と DC-DC 変換器(チョッパ)<sup>9)</sup>の組み合わせがよく用いられるようである。

表 3.2 電力変換の名称<sup>9)</sup>

電力変換の形	名称
DC-DC 変換	スイッチングレギュレータ チョッパ
DC-AC 変換	インバータ
AC-DC 変換	整流器(コンバータ)
AC-AC 変換	サイクロコンバータ マトリクスコンバータ

### (4) アライメントと冷却システム

電磁石システムとしては電磁石本体の他に、電源と冷却水システム及びアライメント用の基準面が必要である(図 3.29、図 3.30)<sup>10)</sup>。

加速器のビームは真空容器の中を光とほぼ同じ速度で移動する。ビームを安定に周回させるために、ビームの軌道を数 10 秒毎に調整しており多数のビーム位置モニターを用いてビーム軌道を測定する。その測定原理は、電荷を持つビームからの電磁場によって真空容器壁に誘導された電荷をボタン電極で電圧信号として検出する(図 3.31)。リング全周のビーム位置を約 1～3 μm の高精度で 3 秒以内に測定できる。ビームが最適な軌道からわずかに外れると、高性能コンピューターが瞬時に計算し補正電磁石を用いて軌道の修正を行う。

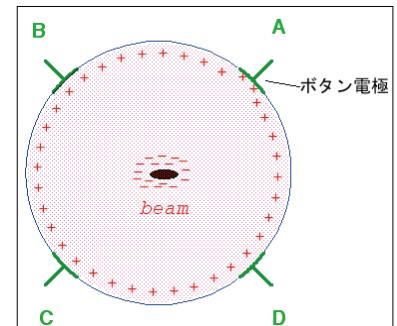
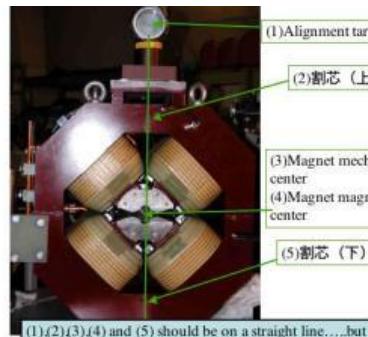


図 3.29 電磁石を構成する部品<sup>10)</sup>

図 3.30 電磁石のアライメント<sup>10)</sup>

図 3.31 ビームライン測定<sup>10)</sup>

コイルの冷却は、電流を流すことによりコイルに発生した熱を取り除くのが目的である。冷却の方法としては、自然空冷、強制空冷(ファン等で強制的に空冷する)、間接水冷(ボビン等を水冷する)、直接水冷(ホローコンダクターを使用する)があり、加速器電磁石では直接水冷がよく用いられる(図 3.32、図 3.33)<sup>10)</sup>。

電流密度、水の流速、コイル抵抗、温度上昇等を考慮して冷却孔のサイズや配置を検討する。冷却水による銅の導体の浸食や腐食は、流れが急激な変化をしている所や流れの乱れの部分が局的に浸食されて銅の部分が薄くなつて、その周辺（だけとは限らない）に酸化銅等が付着することが起こる。



図 3.32 直接水冷式コイルの例<sup>10)</sup> 図 3.33 直接水冷式コイルの断面<sup>10)</sup>

水漏れやコイルの異常な温度上昇は、コイルの破壊に至ることもあり、酸化銅が出て来ることによる他の弊害もある。冷却水管の表面皮膜（銅の酸化物）の機械的・化学的剥離損傷速度は、物理的作用と水の性質（気泡、溶存酸素濃度、温度、pH 等）に依存する。冷却水系の水質にも注意が必要であり、いわゆる純水のレベルや水質を管理・維持も必要である。

### 3.12 ILC のビーム粒子のフローと機器・設備

本章の冒頭で述べたように、国際リニアコライダー（ILC）は、全長約 31km の直線トンネルの両端から電子と陽電子のビームを加速し中央で衝突させ、衝突点に設置した測定器によって、電子・陽電子の衝突による物理現象（新粒子）を観測するための設備・施設である。ビームの生成から衝突点に至るまでのフローと設置される ILC 機器・設備を示す（表 3.3）。

表 3.3 ILC の機器・設備

機器・設備とその役割	機器・設備の内容	説明節
① 電子源（電子ビームを生成する）	レーザー駆動直流電銃、常伝導前段加速器、超伝導 5GeV 加速器、LTR	3.1
② 前段加速器（電子ビームをダンピングリングのエネルギーまで加速する）	偏向電磁石、4 極電磁石、超伝導ソレノイド、超伝導加速モジュール	3.3
③ ダンピングリング : DR, Damping Ring（電子ビームを蓄積してエミッタنسを小さくする）	超伝導ウィグラー、650MHz 超伝導空洞、常伝導電磁石及び電源、偏向電磁石、4 極電磁石、6 極電磁石、キッカー	3.4
④ RTML : Ring To Main Linac（電子ビームを減衰リングから取り出し線形加速器入口まで運ぶ）	偏向電磁石システム、超伝導ソレノイドコイル、バンチ位置検出器	3.5
⑤ バンチ長圧縮器 : BC, Bunch Compressor (RTML の最後の部分でバンチの長さを短くする)	バンチ長圧縮器、常伝導ウィグラー電磁石	3.5(2)
⑥ 主線形加速器 : ML, Main Linac（電子ビームを加速する）	超電導加速空洞（入力結合器、高調波結合器(HOM カップラー)、周波数チューナー）、クライオモジュール（サポートポスト、液面計）	3.6 と 3.7
⑦ 陽電子源（高エネルギー電子ビームで陽電子ビームを生成する）	アンジュレータ、陽電子標的、陽電子捕獲部、常伝導前段加速器、超伝導 5 GeV 加速器、LTR	3.2
⑧ ビーム分配系 : BDS, Beam Delivery System（電子ビームと陽電子ビームを絞って衝突させる）	MPS（加速器保護システム）、ビーム診断装置群、コリメータ、ミューラー壁、クラブ空洞、FFS（最終収束系）、衝突点（IP）フィードバックシステム	3.8
⑨ 測定器（電子・陽電子の衝突による物理現象を観測する）	測定器 (SiD、ILD)	3.9

(陽電子ビームはステップ②～⑤を経て対側の ML (主線形加速器) で陽電子ビームを加速する)

## 出典資料

- 1) 横谷 馨, “リニアコライダー加速器”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14, 2014年9月9日
- 2) 山本 明, “ILC 技術設計書・概要”, 文部科学省有識者会議 ILC 技術設計書・検証作業部会, 平成 26 年 6 月 30 日
- 3) 榎本 収志, “ILC 施設”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14, 2014年9月11日
- 4) The ILC Technical Design Report:Volume3, Part II, Accelerator Baseline Design
- 5) 吉田 光宏, “ILC の電子源・ILC の陽電子源”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14 2014年9月9日
- 6) 加古 永治, “超伝導空洞の基礎”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14, 2014年9月10日
- 7) 仲井 浩孝, “クライオジエニックスおよびクライオモジュール”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14, 2014年9月10日
- 8) 明本 光生, “クライストロン電源”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 14, 2014年9月11日
- 9) 中村 衆, “磁石と真空 I - 電源と電磁石”, 高エネルギー加速器セミナーOH0’ 10, 2010年9月8日
- 10) 増澤 美佳, “電磁石の設計と計測”, 高エネルギー加速器科学セミナー, 2007年5月30日

## 4. 超伝導加速空洞とクライオモジュールの製造技術と参入に際しての課題

本章では、ILC 主線加速器（ML, Main Linac）の重要な中核機器のひとつである超伝導加速空洞とこれを組み込むクライオモジュールについての製造技術及び参入に際して想定される主な課題について述べる。

なお、第3章と同じく極めて専門性の高い内容であり、正確を期すことが求められる。従って、章末出典資料の文章の一部やセミナー等での講演用スライドを引用し、これを編集する内容とした。

### 4.1 超伝導加速空洞

#### (1) 超伝導加速空洞製造基盤技術

超伝導加速空洞を製造するうえでその主材料となる高純度ニオブ材は、高性能な超伝導加速器を開発するための重要な要素の一つである。この高純度ニオブ材を供給できる会社は、世界中でも数社 (Heraeus (独)、Plansee (独)、ATI Wahchang (米)、東京電解㈱ (日)) に限られている。

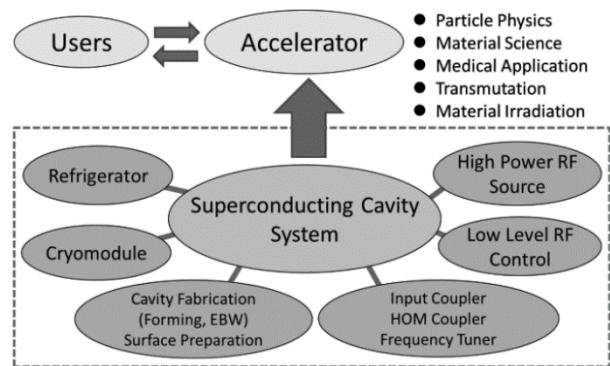


図 4.1 超伝導加速空洞の要素技術<sup>1)</sup>

超伝導加速空洞の製作では、電子ビーム溶接などの信頼性の高い特殊な製造技術が必要とされる。また、多数の超伝導加速空洞を製造するための量産技術も重要な要素となる。超伝導加速空洞の製造元として優れた技術を有する世界の企業は、Pavac (加)、Niowave (米)、AES (米)、RI (独)、Zanon (伊)、三菱重工 (日)、日立製作所 (日)、東芝 (日) の 8 社が挙げられる。

超伝導加速空洞システムの開発に必要となる基盤技術は、超伝導材料・表面物性、超高真空技術(清浄環境)、高周波技術、極低温技術であり幅広い範囲にわたっている。その関連する要素技術としても、図 4.1 に示すように多方面からの連携が必要となる<sup>1)</sup>。

超伝導加速空洞は、図 4.2 に示すようにその外側にヘリウム容器 (helium tank) が溶接されており、空洞とヘリウム容器の間に超流動ヘリウムを満たして空洞を 2 K (−271°C) に保つ。超流動ヘリウムはヘリウム容器に接続されている二相ヘリウム供給配管によって、ヘリウム冷却システムから供給される。通常の液体とは異なり、超流動ヘリウムは核沸騰や膜沸騰を起こさないために、空洞で発生した熱は二相ヘリウム供給配管内の気液自由界面での蒸発潜熱として除去される<sup>2)</sup>。

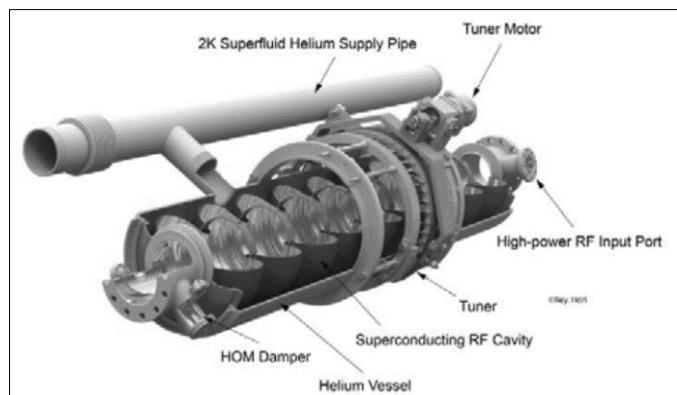


図 4.2 超伝導高周波加速空洞と周辺機器<sup>2)</sup>

#### (2) KEK における超伝導加速空洞研究

KEK では、空洞製造施設 (CFF, Cavity Fabrication Facility) に超伝導加速空洞の製作のために必要な機器、すなわち、サーボ制御プレス機、縦型旋盤、化学研磨室、電子ビーム溶接機 (EBW, Electron Beam Welding) などが一ヵ所に集約設置し、ILC のための超伝導 9 セル空洞製作の研究が行われている。これらの装置は、class 100,000 のクリーンルーム内に集約されている。

図 4.3 にこれらの装置を示すが、もっとも重要な装置は電子ビーム溶接機 (EBW) である。超伝導 9 セル空洞は純ニオブ製であるが、すべてのニオブ部品の溶接組立をこの装置によって行う。電子ビーム溶接機は、溶接を行う部品をチャンバー内に入れた後、チャンバー内を真空引きして空気を排除し

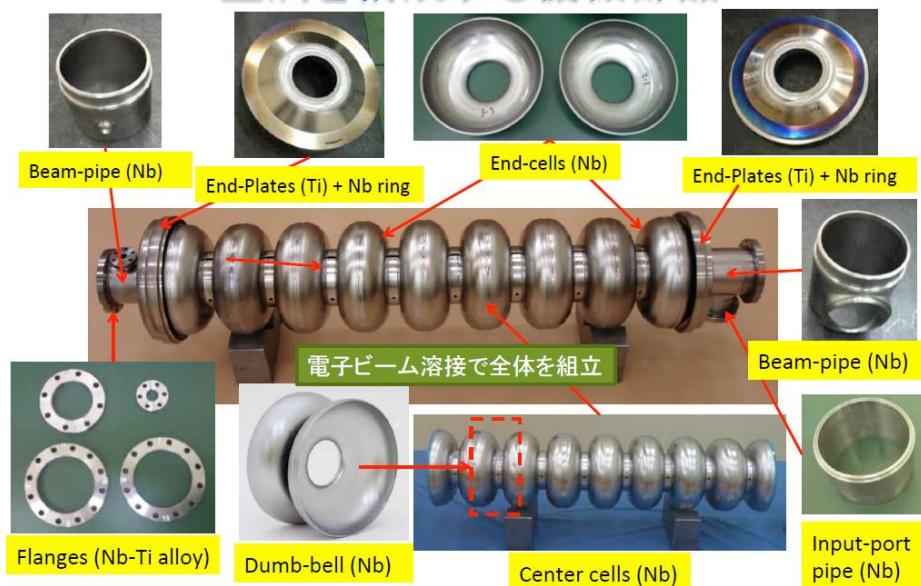
た環境にしてから、電子ビームによって接合部の溶接を行う。これは、溶接部に酸素や窒素などの異物が混入すると空洞の超伝導性能が劣化するためである。また、溶接をした継ぎ目、いわゆるシーム部分においても空洞内面は滑らかな面でなければならない。もしシーム部に欠陥が発生すると、空洞内に高いエネルギーの電磁波を蓄積した時に超伝導状態を破るクエンチの原因となってしまう。このため、溶接時の電子ビームの電流や電圧などを適切に選んで溶接する必要がある<sup>3)</sup>。

図4.4に9セル超伝導加速空洞の部品構成と完成品を示す<sup>4)</sup>。



図4.3 空洞製造施設 (CFF) に設置された主な製造装置<sup>3)</sup>

## 空洞を構成する機械部品



●高工エ研、山中 将

●6

図4.4 超伝導加速空洞と組立部品<sup>4)</sup>

空洞の製作は、セル (cell) 部とビームパイプ (beam pipe) 周辺部分の工程に別れている。

各セルの最も膨らんだ部分を赤道部 (equator)、各セルの両端をアイリス (iris) 部と呼ぶ。セルの製作は、あたかもダンベル (dumbbell) のような形の部品 (今後ダンベルと呼ぶ) を8つ製作する。ダンベルの中央がアイリス部、両端が赤道部になっており、8つのダンベルを赤道部で溶接し、空洞の

中心のセル部分を製作する。ビームパイプ周辺部分は、エンドグループ(end-group)と呼ばれ、高調波減衰器やカプラーポートをビームパイプに溶接して製作する。最後に8つのダンベルを溶接したセル部分と2つのエンドグループ部分を溶接して完成する<sup>3), 4)</sup>。

以下①～9で、KEKのCFFにおける9セル超伝導加速空洞の製造プロセスを示す。

① 9セル空洞のセル

部(後述)に使われるカップと呼ばれるお椀状の部品をニオブ円盤から深絞りにより製造する。(図4.5)

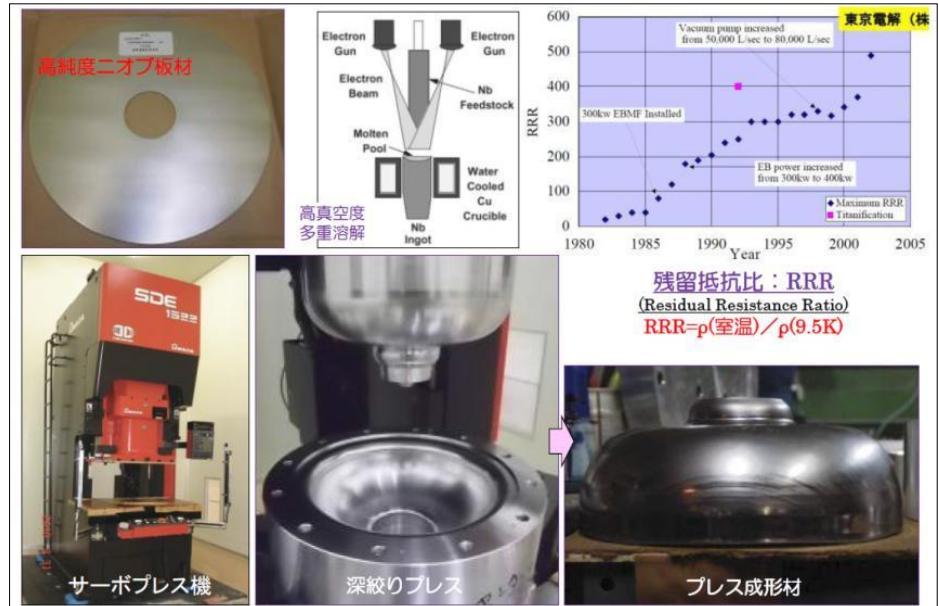


図4.5 高純度ニオブ板材の深絞りプレス<sup>8)</sup>

② プレスされたカップの開口部の端部は縦型旋盤によって精密に機械加工される。機械加工された部品は機械油などで汚れているため、化学研磨室においてフッ酸、硝酸、リン酸の混合液にて化

学研磨され、純水で洗浄した後に乾燥する。カップの底の開口部を溶接により接合して、ダンベルと呼ばれる部品を製作する。(図4.6)



図4.6 トリム加工、化学研磨、ダンベル溶接<sup>8)</sup>

③ 清浄な状態にある部品（ダンベル、エンドグループ）を、電子ビーム溶接機で組立溶接する。

アイリス部および赤道部を接合するためのEBW条件は、空洞性能を制限する可能性のある空洞内表面の溶接ビード上および周辺で発生する表面欠陥を防止するために、特に重要な製造工程である。（図4.7）

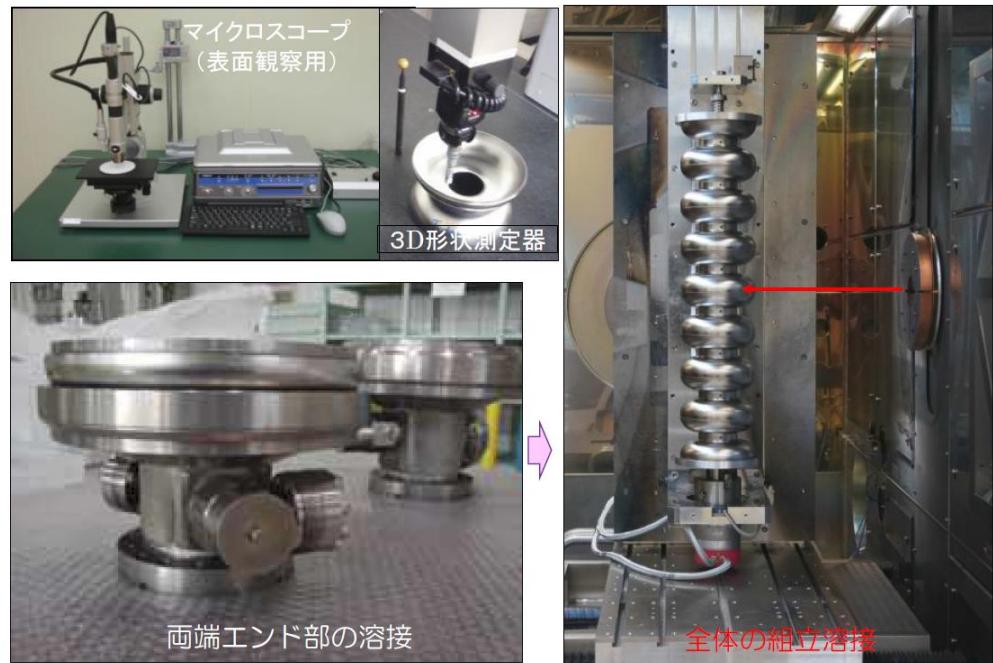


図4.7 9セル超伝導加速空洞の組立溶接<sup>8)</sup>

④ 内面検査と修理（図4.8）

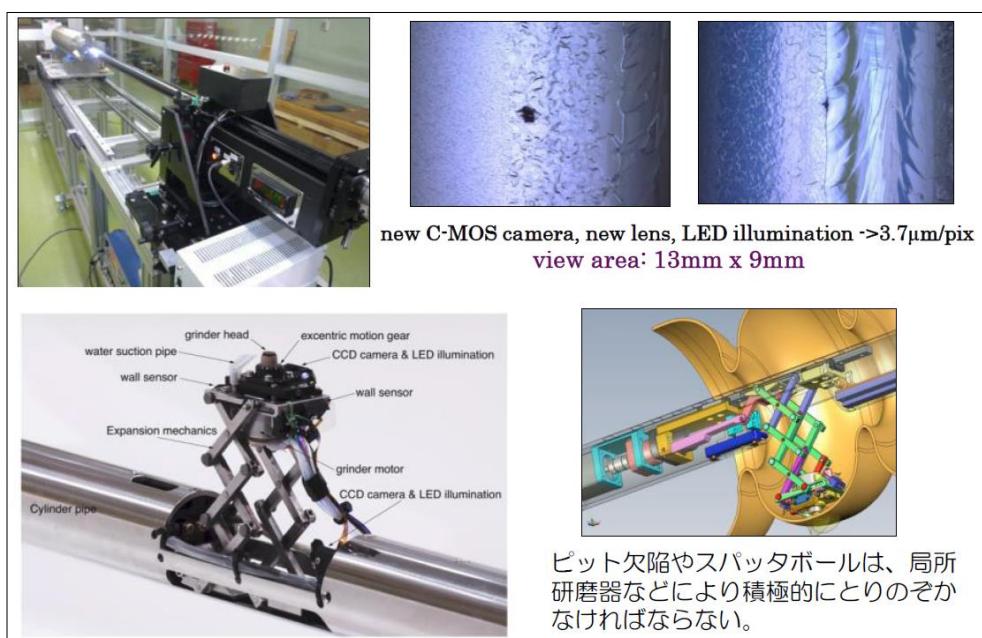


図4.8 内面検査と修理<sup>5)</sup>

⑤ 電解研磨 (図 4.9)

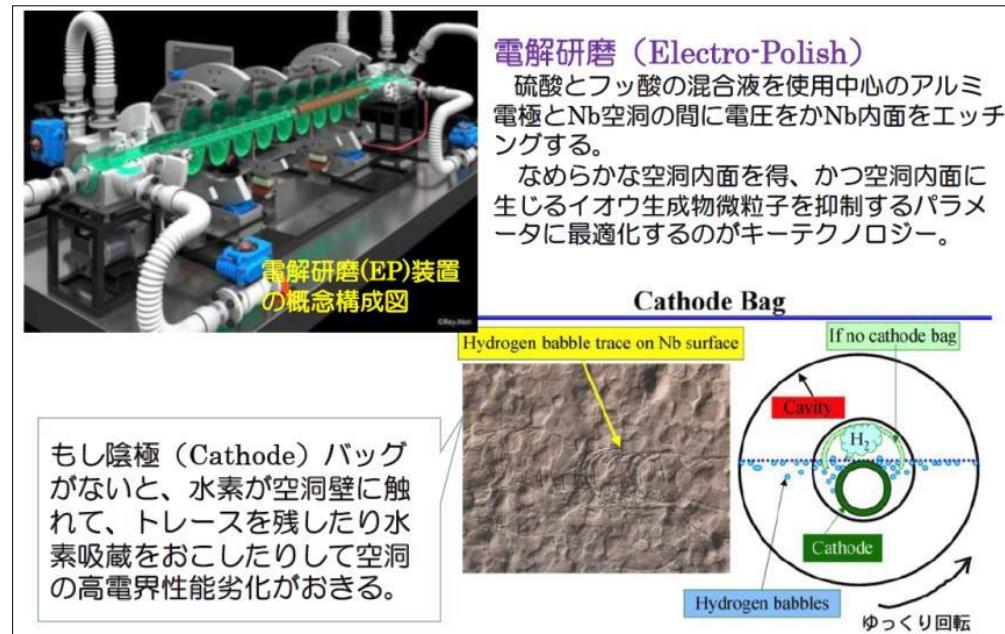


図 4.9 電解研磨<sup>5)</sup>

⑥ 高圧超純水洗浄 (図 4.10)

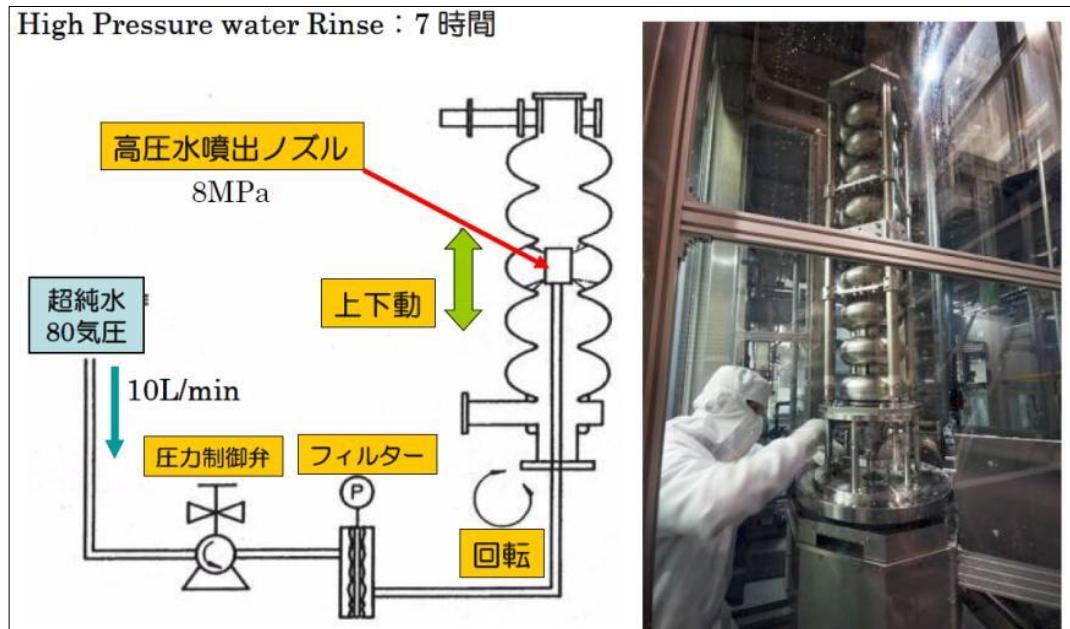


図 4.10 高圧超純水洗浄<sup>5)</sup>

⑦ 热処理：電界性能の低下に影響する水素の除去と9セルの共振周波数調整（図4.11）

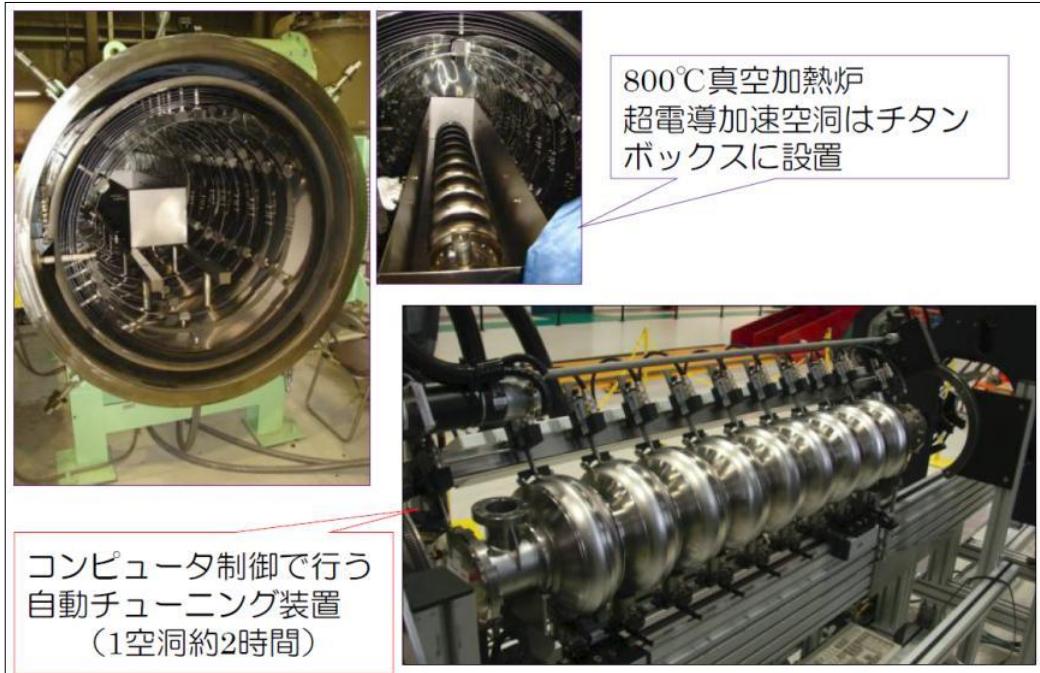


図4.11 热処理とチューニング<sup>5)</sup>

⑧ ベーキング：電界性能の低下に影響する酸素の除去（図4.12）



図4.12 ベーキング<sup>5)</sup>

## ⑨ 超電導加速空洞アッセンブリー (図 4.13)

- 1.3 GHz Nb 9-cell Cavities
- 総数 : 16,024

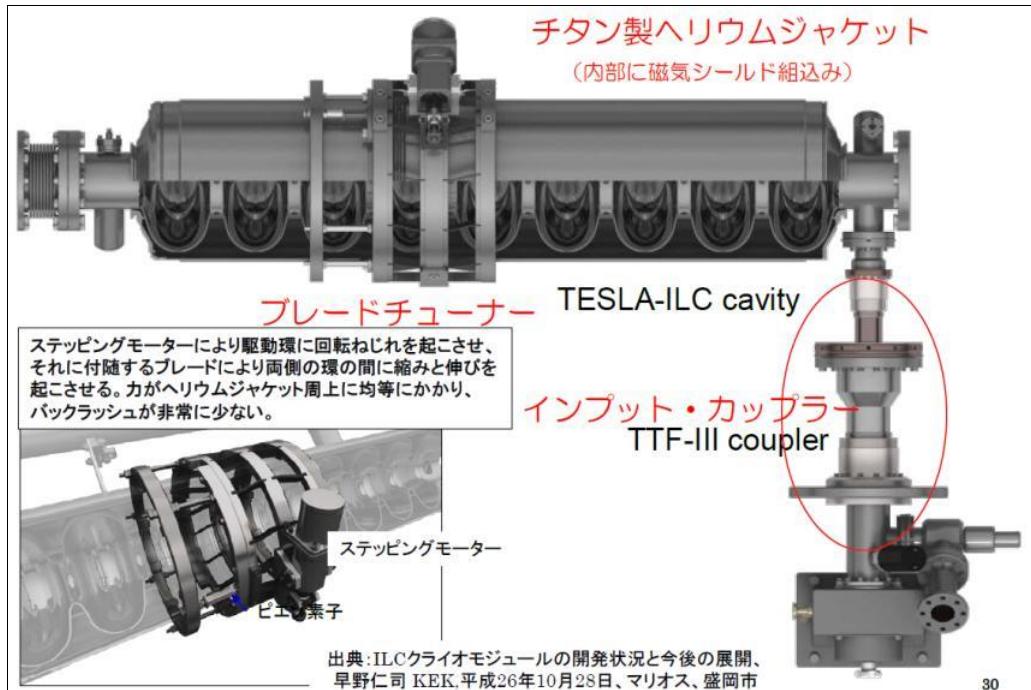


図 4.13 超伝導加速空洞アッセンブリー<sup>5)</sup>

超伝導加速空洞（高圧ガス準拠）→



## 4.2 クライオモジュール

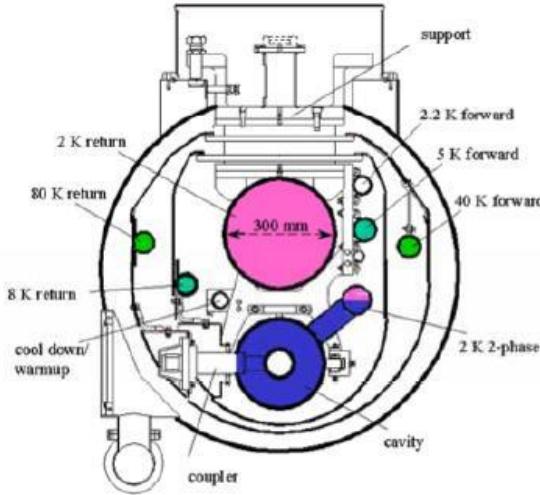
クライオモジュール真空容器内に組込まれているコンポーネントは、超伝導空洞及びその液体ヘリウム容器、入力カップラー、周波数チューナー、4極磁石及び補正コイル、ビームポジションモニター等である。

クライオモジュールは、これらの機器を低温（2K）に保持する為の冷却機器である。真空容器としては、外径 965.2mm × 全長 11m の鉄製のパイプが用いられている。超伝導転移前の空洞周辺の外部磁場は、空洞が超伝導転移後トラップされ空洞の性能劣化の原因となる為、鉄製の真空容器は超伝導空洞にとって磁場遮蔽の機能も持っている。真空容器の内部には外側から中心に向かって 80K 熱輻射シールド板とその冷却配管、5K 輻射シールド板と冷却配管が配置され、5K の輻射シールド板内部には超伝導空洞ヘリウム容器、2K 飽和蒸気圧液体ヘリウム供給配管、内径 300mm の蒸発ガス戻り配管とその他冷却配管が組込まれている。超伝導空洞ヘリウム容器は蒸発ガス戻り配管より支持され、蒸発ガス回収配管はサポートポストを介して真空容器から支持されている<sup>2)</sup>。

以下①～⑪でクライオモジュールの構造を示す。

① クライオモジュールのコンポーネント (図 4.14)

- 真空容器
  - 外径965.2mm、全長11m鉄パイプ
  - モジュール接続部はペローパイプ
  - 磁気シールド
- サポートポスト
  - 空洞ストリング、超伝導4極磁石をクライオモジュール軸方向3箇所の位置で支持
  - 材質:FRP(G-10)
- 熱輻射シールド
  - アルミ板+多層アルミ蒸着フィルム(SI)
  - 40K-80K、4K-5Kヘリウムガス冷却
- 2K液体ヘリウム蒸発ガス回収配管
  - 内径300mm、全長2.3kmのSUSパイプ
- その他冷却配管
- 超伝導空洞(8台)
  - 液体ヘリウム容器、パワー入力カップラー、ホモカップラー、周波数チューナー
- 超伝導4極電磁石(1台)
  - 電流リード、補正コイル、ビームモニター

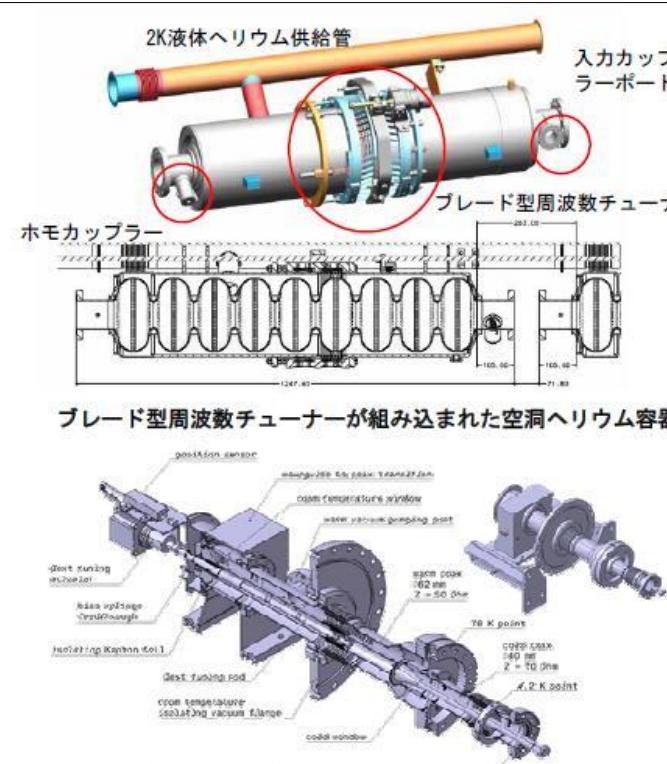


DESY-TESLA-TYPE-III  
クライオモジュール断面図

図 4.14 クライオモジュールの断面<sup>6)</sup>

② 超伝導加速空洞+付属品 (図 4.15)

- 超伝導空洞の動作温度:2K
  - 冷却:飽和蒸気圧超流動ヘリウム (温度2K、圧力3.1kPa)
- 超伝導空洞ヘリウム容器
  - 材質:チタン
    - 熱収縮率がニオブとほぼ同じ
    - チタン:0.134%、ニオブ:0.129%
  - ヘリウム容器長:1036.2mm
- ヘリウム容器付属部品
  - 周波数チューナー
    - 5Kに冷却されたモータ:遅い周波数変化
    - ピエゾ素子:速い変化(1200Hz)
  - 入力カップラー
  - ホモカップラー
  - 2K液体ヘリウム供給管
    - 材質:チタン
  - 空洞容器スライドサポート

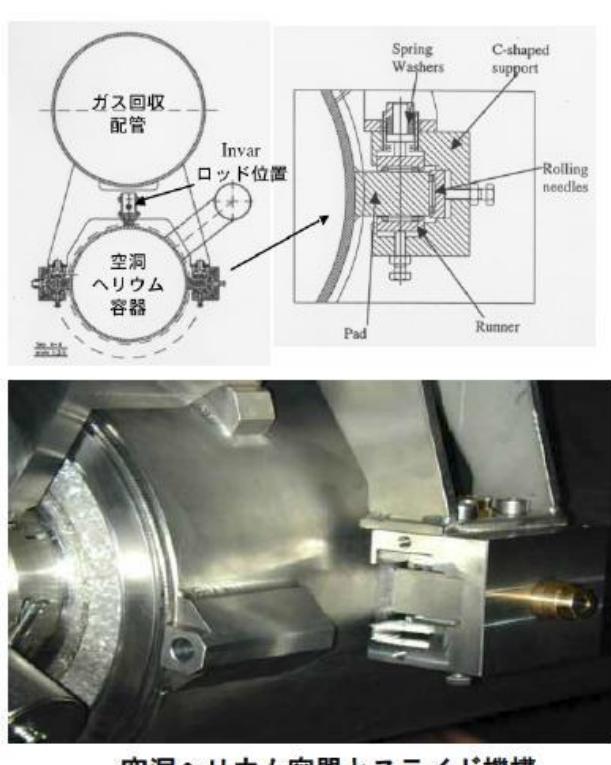


TESLAタイプ入力カップラー

図 4.15 超伝導加速空洞アッセンブリー<sup>6)</sup>

③ 超伝導加速空洞の支持機構 (図 4. 16)

- 空洞ヘリウム容器は内径300mmの蒸発ヘリウムガス回収配管から支持されている。
  - 蒸発ヘリウムガス回収配管の冷却に伴う熱収縮量: 32mm(配管全長 > 12m、ステンレスの熱収縮量 (300K->2K): 0.265%)
- ヘリウムガス回収配管は真空容器から3本のポストで支持されている。
  - 3本のポストの内、中央のポストは真空容器に固定され、両側のポストはスライド機構により真空容器に対してクライオモジュール軸方向に対して拘束されない。
- 空洞ヘリウム容器には入力カップラーが室温から接続されている。
  - 両端の空洞容器は回収配管に固定されると真空容器に対して15mm位置変位する。
  - 入力カップラーを破損する危険性がある。
  - 空洞ヘリウム容器支持機構にスライド機能を持たせる。

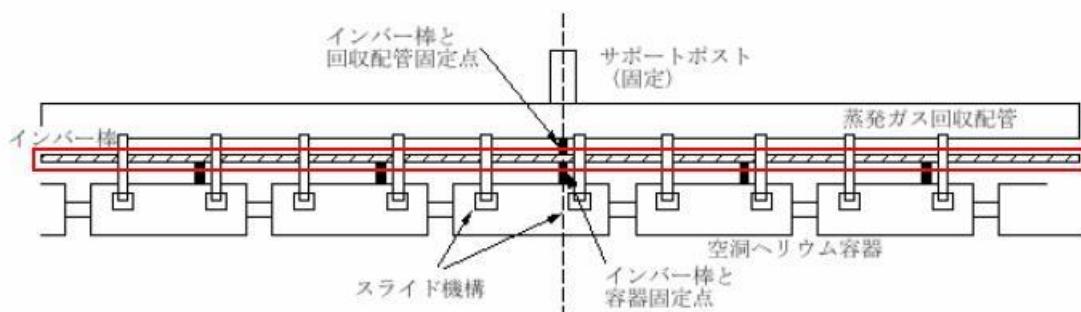


空洞ヘリウム容器とスライド機構

- 空洞容器の冷却時の位置変化を小さくするためにInvar棒を用いる。
  - Invar熱収縮率: 0.034%
- 空洞ヘリウム容器は下図に示すようにInvar棒により固定される。
- Invar棒はクライオモジュールの中央のサポートポスト位置に固定される。
  - 中央のサポートポスト位置は真空容器に対して固定されている。
- この結果、両端の容器位置の変化は2mm以下となる。

空洞番号	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>
空洞位置@室温	5693	4312	2929	1547	165	1217	2599	3981
空洞位置@2K	5678	4301	2921	1543	165	1214	2592	3970
ΔL	15.1	11.4	7.8	4.1	0.4	3.2	6.9	10.5
ΔL <sub>in</sub>	1.9	1.5	1.0	0.5	0.1	0.4	0.9	1.4

冷却時の空洞容器の中心位置からの距離変化



超伝導空洞ヘリウム容器軸方向固定概念図

図 4. 16 超伝導加速空洞の支持機構 <sup>6)</sup>

④ 超伝導加速空洞の入力カップラー（図 4.17）

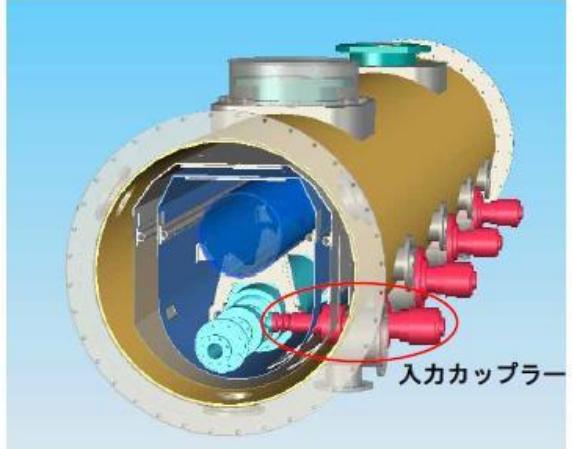
<ul style="list-style-type: none"> <li><b>入力カップラー</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>ビーム加速を行うためのRFエネルギーを超伝導空洞に与える。</li> <li>入力カップラーは、室温の真空容器に固定されている。この為、低温部と室温部を直接接続している。</li> <li>室温からの熱伝導による侵入熱は、5K及び80Kの熱輻射シールド板、あるいはヘリウム冷却配管からのサーマルアンカーにより除去される。</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Low-Lossタイプ用入力カップラー侵入熱 (1台当り)</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>80K</th> <th>5K</th> <th>2K</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>定常ロス[W]</td> <td>1.24</td> <td>0.54</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>RFロス[W]</td> <td>2.14</td> <td>2.88</td> <td>0.25</td> </tr> <tr> <td>合計[W]</td> <td>3.38</td> <td>3.42</td> <td>0.25</td> </tr> </tbody> </table>  <p>入力カップラー低温側アンカー</p>  <p>KEK-STFで開発が進められている 45MV/m空洞用クライオモジュール</p>		80K	5K	2K	定常ロス[W]	1.24	0.54	0.00	RFロス[W]	2.14	2.88	0.25	合計[W]	3.38	3.42	0.25
	80K	5K	2K														
定常ロス[W]	1.24	0.54	0.00														
RFロス[W]	2.14	2.88	0.25														
合計[W]	3.38	3.42	0.25														

図 4.17 高周波電流の入力カップラー<sup>6)</sup>

⑤ サポートポスト（図 4.18）

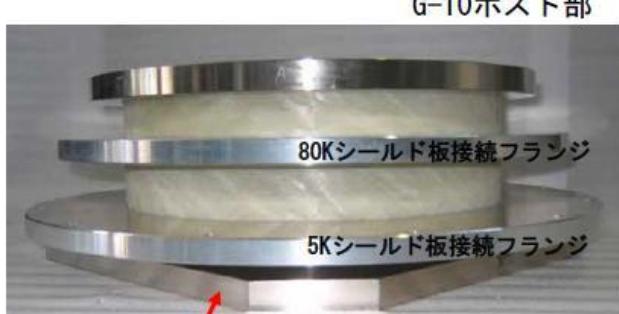
<ul style="list-style-type: none"> <li>超伝導空洞8台、4極電磁石1台、冷却配管及び熱輻射シールド板は3本のポストで真空容器から支持される。           <ul style="list-style-type: none"> <li>ポスト1本当りの支持荷重は750kgである。</li> </ul> </li> <li>クライオモジュールの中央に位置するポストは真空容器に固定されるが、両側のポストは真空容器上をスライドし内部機器の熱収縮の影響を緩和する。           <ul style="list-style-type: none"> <li>両側のポストの移動量: 12.9mm、13.2mm</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>G-10ポスト部</b></p>  <p>80Kシールド板接続フランジ 5Kシールド板接続フランジ</p> 
---	--

図 4.18 サポートポスト<sup>6)</sup>

⑥ 热辐射シールド (SI : Super Insulation) (図 4.19)

- 热辐射シールドの構成
  - 5Kと80Kに冷却されたアルミ板
    - 5Kシールド板表面積=30m<sup>2</sup>
    - 80Kシールド板表面積=35m<sup>2</sup>
  - このアルミ板を覆う多層のアルミ蒸着フィルム(スーパーインシュレーション:SI)から構成される。
    - 5Kアルミ板には10層のSI
    - 80Kアルミ板には30層のSI
- アルミ蒸着フィルム
  - 6~25ミクロンのポリエステルフィルムにアルミを約0.1ミクロン蒸着
  - 放射率: $\epsilon=0.056$  (80K~300K)、 $\epsilon=0.011$  (4.2K~80K)

平行平板の热辐射による伝熱

$$Q_r = A\sigma(1/(1/\varepsilon_h + 1/\varepsilon_c - 1))(T_h^4 - T_c^4)$$

A:表面積、 $\sigma$ :ステファン・ボルツマン定数、添え字は、h高温面、c低温面を示す。



热辐射シールドの組立て

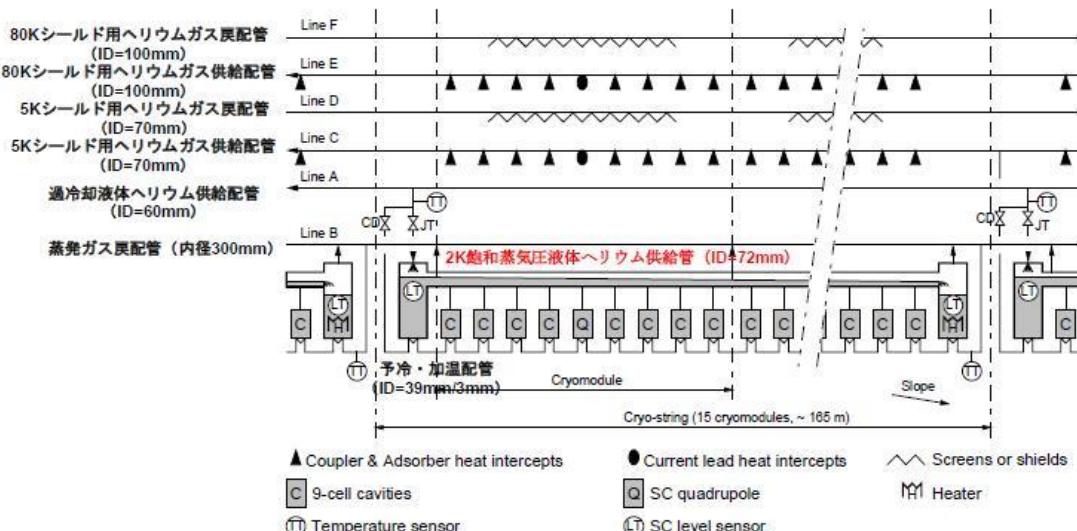


80K热辐射シールド板

4.19 热辐射シールド<sup>6)</sup>

⑦ 冷却配管と回路 (図 4.20)

- クライオモジュール内部には8種類の冷却配管が配置されている。
- 15台のクライオモジュールを1クライオストリング(165m)とし、このストリングの両端には液面制御用の液溜めがある。液面は2K液体ヘリウム供給配管内部にあるように制御される。
- 2Kの飽和蒸気圧液体ヘリウム(圧力3.1kPa)は過冷却液体ヘリウム供給管からJT弁で等エンタルピー膨張されて得られる。



クライオモジュール内冷却回路

図 4.20 冷却配管と回路<sup>6)</sup>

⑧ 蒸発ヘリウムガス戻り配管（図 4. 21）

- 蒸発ヘリウムガス配管の役割
  - 減圧ポンプを含めた冷凍機システムは2.3kmの間隔で配置される。蒸発ガスはこの間を本配管で減圧ポンプまで導かれる。
  - 蒸発ガスの流れに伴う管内での圧力分布は飽和蒸気圧ヘリウムの温度に影響を与える。パイプの口径300mmは超伝導空洞の運転温度を考慮して決められている。
  - 戻りガス配管には8台の空洞容器と1台の超伝導4極電磁石が吊るされる（クライオモジュールの背骨）。
    - 配管に吊るされる重量は2トン程度になり、3本のポストでサポートされた場合の戻りガス配管の変位は50ミクロン以下である。



クライオモジュール内冷却配管

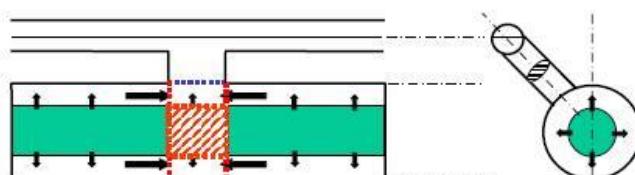
図 4. 21 蒸発ヘリウムガス戻り配管<sup>6)</sup>

⑨ 2K 飽和ヘリウム供給管（図 4. 22）

- 超伝導空洞への飽和液体ヘリウムの供給
  - 長さ165mの1冷却ユニットに渡された内径72mmの配管+内径55mm（長さ~200mm）枝管
  - 空洞の熱負荷は飽和液の蒸発熱で除去される。
  - 蒸発面積が十分確保されない場合（ヘリウム供給管内を液で満たしてしまう）、安定な冷却が期待できない。
- 热負荷がある場合の液体ヘリウム内部の温度分布
  - 热負荷：4空洞で30W（設計値の略2倍）
  - 加熱面を空洞面とし、又簡単化のため円筒形状とした。
  - 热計算は、粘性とエントロピーがゼロの超流動成分と粘性とエントロピーをもつ常流動成分からなる2流体モデルで行った。



空洞容器及び2Kヘリウム供給管



空洞容器内ヘリウム温度分布計算モデル

図 4. 22 2K 飽和ヘリウム供給管<sup>6)</sup>

⑩ クライオモジュールの組立工程（図 4. 23）



図 4. 23 クライオモジュールの組立工程<sup>5)</sup>

⑪ クライオモジュール：高圧ガス準拠（図 4. 24）

- ・総数：1,855 台
- ・Type A - 1.3 GHz Nb 9-cell Cavities × 9 台 : 1,182 台
- ・Type B - (1.3 GHz Nb 9-cell Cavities × 8 台) + 超伝導四極電磁石 : 673 台
- ・1.3 GHz 10MW クライストロン電源装置 : 436 台



図 4. 24 クライオモジュール外観<sup>9)</sup>

#### 4.3 参入に際しての課題

3章及び4章において示した ILC を構成する装置設備参入に際しての技術的課題を説明する前に加速器全体で必要となる要素技術について述べる。

まず、電子と陽電子を加速させるためには真空技術が欠かせない。なぜなら、大気中で電子を加速させようと思ってもすぐに空気の分子と衝突して加速されない為である。また、粒子加速の方式は超伝導材料からなる加速空洞にマイクロ波を導入し、その電場で荷電粒子の加速を行う。そのため、超伝導物理と低温工学をベースに機械加工法の検討や表面処理・接合が必要となったり、電磁的な特性を最大限に引き出すために形状・精度を設計したりと、幅広い専門知識と共に高い製造技術が求められる。

他にも、荷電粒子の方向を変えたり収束させたりする電磁石、 $\mu\text{m}$ 以下の精度でビーム位置を制御するために必要な微動機構や防振対策、冷媒の供給・回収のための配管や電磁弁、各種電源および低ノイズ信号ケーブルやコネクタ類など、必要とされる部材は多岐にわたる。

##### (1) 超伝導加速空洞の製造プロセスとクライオモジュールの組立 (図 4.25、図 4.26)

高純度 Nb 板材のプレス成形と電子ビーム溶接による空洞組立以後の表面処理や熱処理等、高圧ガス検査までの製造プロセスの数は多い。可能な範囲でプロセスの省略及び各プロセスの時間削減のための工夫による量産技術の確立が必要である。また、クライオモジュールの組立企業で製造された部品・機器・コンポーネントへ搬入し、性能試験後にクライオモジュールとして組立てられ、加速電界試験を合格したものがトンネル内へ搬送し設置される。欧米製と国産品が混入した組立工程となるため、生産管理体制と品質保証システム等のグローバルスタンダード的な基準の適用が求められる。

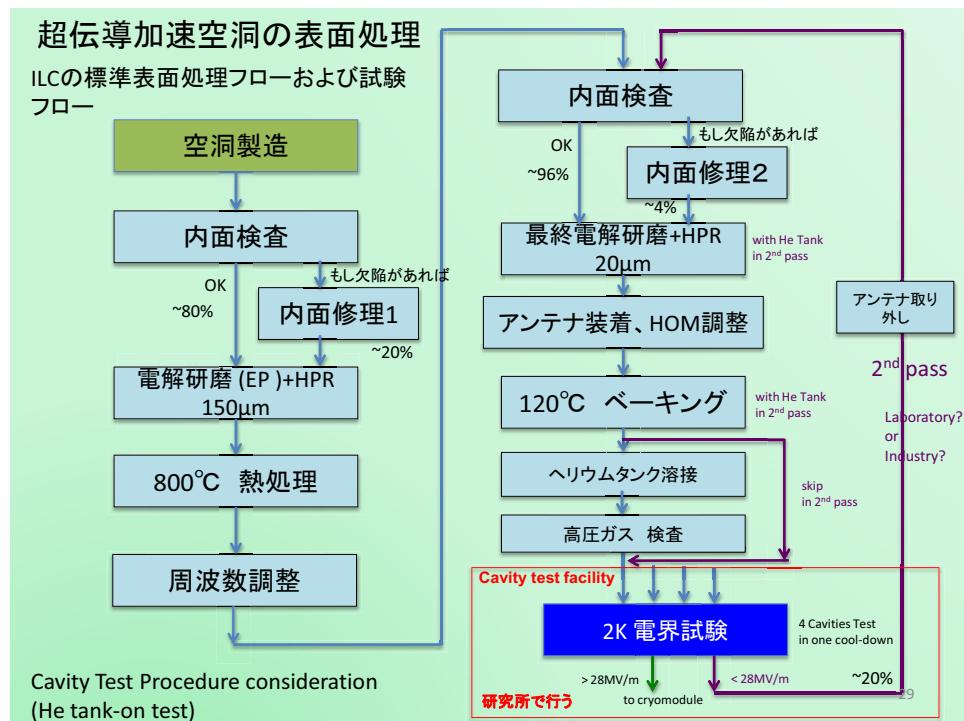


図 4.25 超伝導加速空洞の表面処理<sup>5)</sup>

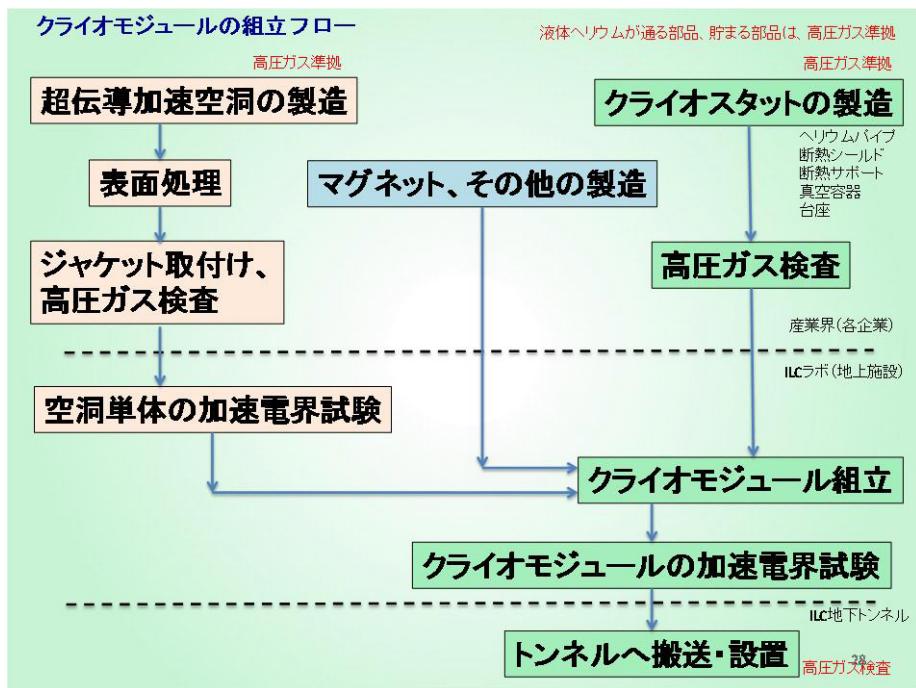


図 4.26 クライオモジュールの組立工程<sup>5)</sup>

## (2) 高圧ガス対応の超伝導加速空洞とクライオモジュール<sup>1)</sup>

クライオモジュールに組み込まれた超伝導空洞を用いてビーム運転する加速器では、高圧ガス保安法に遵守した超伝導空洞の製作が必須である。

超伝導空洞の構成材料として、純ニオブ材、ニオブチタン合金材、純チタン 2 種材が用いられ、素材同士および異材組合せの溶接部は電子ビーム溶接 (EBW)、レーザービーム溶接 (LBW) や TIG 溶接で接合される。これらの素材や溶接接合部の材料については、引張試験や衝撃試験などを行って、得られる機械強度試験の結果が許容値以上であることを示す必要がある。さらに、応力解析や疲労解析などの強度計算の結果を含む詳細基準事前評価申請書を作成して、事前に製作の承認を得なければならない。

実際の空洞製造時には、強度計算書、材料証明書、溶接施工法確認試験記録、溶接要領書、耐圧・気密試験手順書などを添付した高圧ガス試験申請書を作成し、専門員立会いでの耐圧・気密試験を実施しなければならない。空洞性能の確認後には、チタン製ジャケットが溶接され、最終耐圧気密試験が行われる。この試験成績書を提出することで 1 空洞ごとに合格証が発行される。これら一連の手続きを完了することにより、クライオモジュールへの超伝導空洞の組立開始が可能となる<sup>1)</sup>。

クライオモジュールについても同様の手順となる。

## (3) 化学研磨 (BCP) と電解研磨 (EP)<sup>7)</sup>

化学研磨 (BCP: Buffered Chemical Polishing) では、研磨速度を抑える目的で緩衝剤としてリン酸を加えるのが一般的である。BCP 液は 68%硝酸 : 47%フッ化水素酸 : 85%リン酸の容積比で 1:1:1 あるいは 1:1:2 の配合比のものが多く使用されている。この BCP 液を空洞内に流し溜込む方法により空洞内面を研磨している。

電解研磨 (EP: Electro Polishing) の電解液は、98%硫酸 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) と 47%フッ化水素酸 (HF) の容積比 9:1 の混合溶液が用いられる。

化学研磨 (BCP) や電解研磨 (EP) では硝酸や硫酸、フッ化水素酸という毒・劇物薬品を多量に使用する。特にフッ化水素酸は特定化学物質第 2 類物質にも指定され、その使用法や保管法には特に注意が必要である。使用や保管、廃棄に際しては、薬品の Material Safety Data Sheet (MSDS) を参考に、適切かつ安全な方法で取り扱わなければならない。

### 出典・参考資料

- 1) 加古 永治, “超伝導空洞の基礎”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’ 14, 2014年9月10日
- 2) 仲井浩孝, “クライオジエニックスおよびクライオモジュール”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’ 14, 2014年9月10日
- 3) 佐伯 学行, 研究報告 “KEKにおけるILCのための超伝導9セル空洞製造の研究”, 2013年12月6日
- 4) 山中 将, “ILC超伝導加速空洞の開発状況と今後の展開”, 第1回加速器関連産業参入セミナー, 2014年10月28日
- 5) 早野 仁司, “ILCクライオモジュールの開発状況と今後の展開”, 第1回加速器関連産業参入セミナー, 2014年10月28日
- 6) 大内 徳人, “クライオモジュールの設計”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’ 06, 2006年8月30日
- 7) 沢辺 元明, “超伝導空洞の表面処理”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’ 14, 2014年9月10日
- 8) 山中 将 “超伝導加速空洞の作り方”, ILC夏の合宿, 2013年7月21日, 富山
- 9) 文部科学省 ILCに関する有識者会議(第1回 平成26年5月8日)配付資料3「ILC計画について」

## 5 加速器関連産業

株野村総合研究所がまとめた『ILCを核とした東北の将来ビジョン策定調査・報告書<sup>1)</sup>』によると、ILCの効果が及ぶ産業は、「加速器原理を用いた製品産業」と「加速器を活用することにより高度化する産業（加速器ユーザー産業）」と「加速器の建設を支える産業（加速器サプライヤー産業）」の3つに分けられている。以下、これらの産業について同報告書から引用して示す。

### (1) 加速器原理を用いた製品産業<sup>1)</sup>

加速器原理を用いた製品産業は、加速器の本体を製造している重電・重工メーカーや各種分析機器メーカー、それらの部品を生産している電子部品メーカーや機械加工メーカーなどが挙げられる。また、普及型の小型加速器を活用するメーカーとしては、試験分析機メーカーやそれらの部品メーカーや加工メーカーも該当する（表5.1）。

表5.1 加速器原理を用いた製品産業と関連企業の例<sup>1)</sup>

分類	応用分野	関連する企業
普及型医学・産業用 小型加速器	小型電子線加速器 検診・診断用（PET等） 普及型（X線等）治療装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 三菱電機、日立製作所</li> <li>➢ 日本電子、IDX</li> <li>➢ 東芝メディカルシステムズ</li> <li>➢ 島津製作所</li> </ul>
	滅菌・化学・医学利用 企業内・分析・製造 微細加工・電子顕微鏡	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 日本電子、日立ハイテクノロジー</li> <li>➢ 堀場製作所、ミツトヨ、日本分光、リガク</li> <li>➢ 三菱電機、コマツ、アマダ</li> <li>➢ オリンパス</li> <li>➢ 東京エレクトロン、アドバンテスト</li> </ul>
加速器の原理を活用した製品	電子顕微鏡、半導体製造装置、プラウン管、電子レンジ、電磁調理器等	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 家電メーカー</li> <li>➢ パナソニック、日立、東芝</li> <li>■ 半導体製造装置メーカー</li> <li>➢ ニコン、キヤノン、アルパック、大日本スクリーン</li> </ul>

（出典）インタビューや各種資料より野村総研作成

### (2) 加速器を活用することにより高度化する産業（加速器ユーザー産業）<sup>1)</sup>

1次ユーザー産業は、放射線を利用して製造される素材・部品・製品を製造している産業であり、2次ユーザー産業は、鋼材や半導体、家電、自動車など幅広い分野の産業が挙げられる（表5.2）。

表5.2 加速器利用者（ユーザー）の産業と関連企業の例<sup>1)</sup>

大分類	分類	応用分野	関連する企業
1次 ユーザー 一産業	放射線を利用して 製造される素材・ 部品・製品	熱間および冷間圧延され た鉄鋼鋼材・鋼板、アルミニウム圧延品、各種の半導 体・集積回路、液晶パネル、 ラジアルタイヤ、各種の機 能性繊維・繊維原糸、ディ スプレー・ブル医療用具、等	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 素材メーカー</li> <li>➢ 新日鐵、神戸製鋼</li> <li>■ 家電メーカー</li> <li>➢ パナソニック、日立</li> <li>■ 半導体メーカー</li> <li>➢ 東芝、ローム</li> <li>■ 医薬品メーカー</li> <li>➢ 武田、アステラス</li> <li>■ 医療機器メーカー</li> <li>➢ オリンパス、テルモ</li> </ul>
2次 ユーザー 一産業	放射線を利用して 高度化する製品（加 速器製品や1次ユ ーザー産業による 材料・部品・製品 を活用する製品）	自動車ボディー、自動車、 自動車エンジン、液晶テレ ビ、各種のデジタル機械器 具、各種のデジタル情報通 信装置 等	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 自動車メーカー</li> <li>■ 家電・半導体メーカー</li> <li>■ 機械メーカー</li> <li>■ 医薬品・医療機器メーカー</li> <li>■ 素材メーカー</li> </ul>

（出典）インタビューや各種資料より作成

### (3) 加速器の建設を支える産業（加速器サプライヤー産業）<sup>1)</sup>

加速器サプライヤー産業としては、主に加速器の製作・設置に係る企業が挙げられる。これはさらに、関連機器メーカーと建設工事企業の2つの分野に分かれる。

ILCの建設は、加速器の製作・設置に係る国際入札により、世界の研究機関や企業へ発注されることになる。

具体的には、機器の製作に関しては、重電・重機メーカー、制御機器メーカー、高周波機器メーカー、機械加工メーカー、研鑽機器メーカー、電気部品メーカー、計測器メーカー、素材メーカー、さらにこれらの部品・素材を加工・生産する中小企業を含めたメーカーが対象になる。また、これらの機器の設置工事を行う土木建設企業も ILC 関連企業として対象になる。

東北における加速器サプライヤー産業にかかる企業は、重電・重機メーカー、機械加工メーカー、高周波機器メーカー、電機部品メーカー、計測器メーカー、素材メーカー、スーパーコンピューターメーカなどである。これらの企業の中で表 5.3 に示すように、東北に事業所のある企業としては、三菱電機、アルパック、NEC トーキン、TDK、アルプス電気、京セラ、富士通などが挙げられる。なお、実際の ILC 建設の際には、重電・重機メーカーなどの協力企業として配管等の各種設備を担う板金製缶企業や、実験分析装置のアタッチメントの加工などをを行う機械加工企業などが必要であり、東北の中小企業が関連企業として関与していくと推測される。

表 5.3 加速器サプライヤー産業の企業例（東北を中心に）<sup>1)</sup>

分類	主要機器	関連する企業
重電・重機	加速器システムの主要機器等	三菱重工、住友重工、IHI 日立製作所、三菱電機、東芝
制御機器	ビーム加速器制御装置等	日立製作所 三菱電機 東芝 東京エレクトロン
電気・電子部品	電磁石、電源、各種電子部品等	NEC トーキン（電磁石、コイル） TDK（コンデンサ） アルプス電気（スイッチ） 富士通（半導体） ルネサス（半導体）
高周波機器	大電力高周波源、高周波導波管等	日本高周波（高周波機器） 東芝 NEC
機械加工	加速管部品、真空機器等	アルパック（真空装置） 入江工研（真空装置）
素材	高純度金属、セラミック等	京セラ（絶縁体） 古河電工（超電導線材） フジクラ（光ファイバー）
計測器	ビームモニター、放射線モニター等	浜松ホトニクス（検出器部品・光電子増倍管） 林英精器（トランス・コネクタ） ウシオ電機（ビーム光源）
計算機器	測定データ処理システム、スーパーコンピュータ等	富士通 日立製作所 NEC
建設・土木	トンネル、研究棟等	建設・土木会社
その他	配管設備、分析アタッチメント加工等	板金製缶企業（配管など各種設備） 各種機械加工企業（分析アタッチメント加工等）

（出典） インタビュー や各種資料より作成

### 出典資料

- 1) “ILC を核とした東北の将来ビジョン策定調査報告書”，（株）野村総合研究所，平成 24 年 7 月

## 6 参入に向けた取組事例

本調査での訪問調査等を踏まえ、県内外における加速器関連産業への参入事例を示す。

### (1) 茨城研究開発型企業交流会の取組み

茨城研究開発型企業交流会（IRDA：Ibaraki Research & Development Association）は茨城県内の研究機関や大学・企業と連携し、新技術や新製品の開発に積極的に取り組む「ものづくり企業団体」である。1991年の設立で、中小企業が主体で現在30社が会員である<sup>1)</sup>。

- 会長／ツジ電子(株)、辻 信行 代表取締役
- 会員／研究開発を積極的に志向する県内企業
- 事務局／IRDA会員企業が持ち回り担当
- 年会費による自主活動を推進
- 共同受注／㈱ビームトロン
- 企画立案／ペンギンシステム(株)

IRDAの活動方針は次の5つである<sup>2)</sup>。

- ① 会員が IRDA の営業窓口として活動する
- ② IRDA 内部での製作協力を通じてコスト競争力を高める
- ③ 共同受注や共同研究を通じて利益を生み出す団体に進化させる
- ④ 会員相互に会員が抱える問題の解決に努力する
- ⑤ インターンシップを産学連携の一環として活用していく

産総研や KEK 等の多くの研究機関ならびに企業の研究所が集積する「つくば研究学園都市」という環境に恵まれた条件はあるものの、中小企業が大企業との棲み分けとして設立した企業団体である。

2014年にKEKで開催された「IRDA技術展示&講演会」では、KEK本館ロビーを使用して20社が展示ブース出展、小林ホールでKEK研究者5名が講演、その後展示会場において個別での企業と研究者とのQ&Aが行われたことが印象的であった。

ILCに関する県内企業体制及び取組みの参考になり得るケースである。

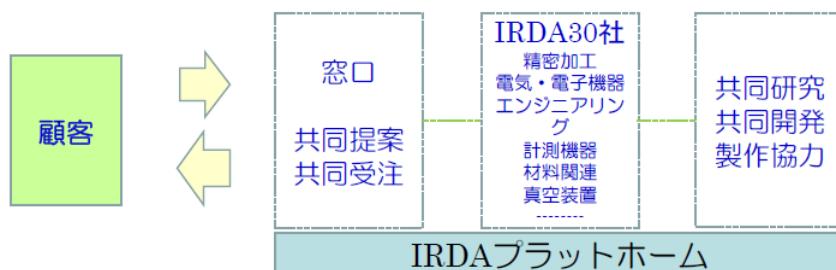


図 6.1 IRDA 共同受注体

### (2) 加速器関連研究機関との連携事例

#### ① KEKとA社（千葉県）との共同研究事例<sup>3)</sup>

ILC用9セル超伝導加速空洞のエンドグループの製造方法の効率化の例（複雑な形状のHOMカッターをいかに効率的に製造するかという研究課題）

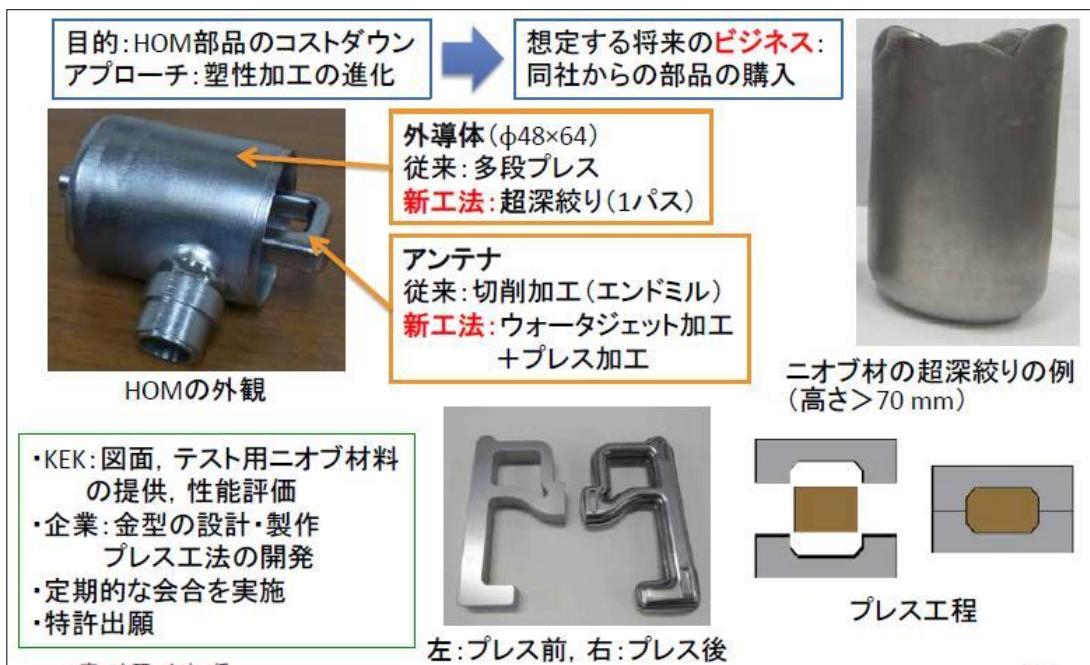


図 6.2 KEK との共同研究事例 1<sup>3)</sup>

## ② KEK と B 社 (東京都) との共同研究事例<sup>3)</sup>

ILC 用 9 セル超伝導加速空洞ハーフセルの金型製造と Nb 板材のプレス成形及びトリム加工の最適化

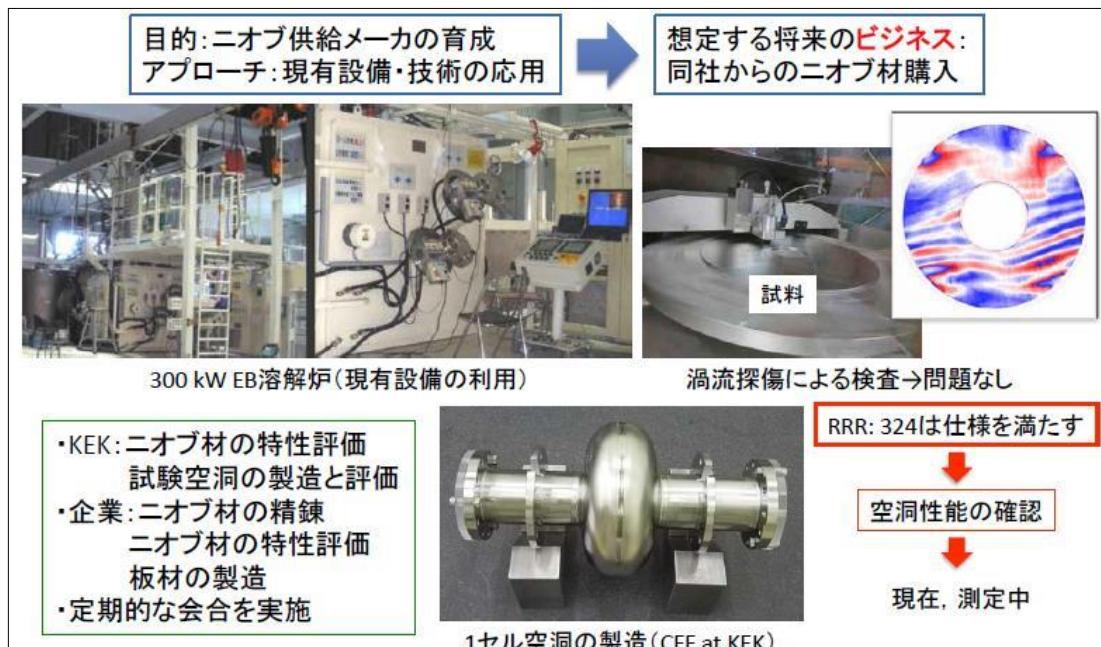


図 6.3 KEK との共同研究事例 2<sup>3)</sup>

### ③ KEK と C 社 (千葉県) との共同研究事例<sup>3)</sup>



ILC 用 9 セル超伝導加速空洞用の Nb 材の溶解と板材の製造技術開発

図 6.4 KEK との共同研究事例 3<sup>3)</sup>

### ④ J-PARC と D 社 (岩手県) との連携事例

東海村の大強度陽子加速器施設「J-PARC」内で、素粒子の一種「ニュートリノ」の生成に用いられ、陽子からニュートリノへとビームが変化する過程の中で砂時計のような形をした電磁ホーンを国内で初めて単独製造に成功し、地元新聞でも取り上げられた。



図 6.5 KEK との共同研究の事例 4

### 出典資料

- 1) 茨城研究開発型企業交流会 (IRDA) HP
- 2) 結成 25 周年!!茨城の研究開発型企業交流協会「IRDA (イルダ)」, 関東経済産業局電子広報誌いとじゅつけん, 平成 26 年 2 月 10 日
- 3) 山中 将, “ILC 超伝導加速空洞の開発状況と今後の展開”, 第 1 回加速器関連産業参入セミナー, 2014 年 10 月 28 日

## 7 加速器関連産業への参入に関する意向調査

### (1) 調査目的

- ① 県内企業の加速器関連産業に参入する意向を確認し、次の候補選定の参考とする。
  - ・ 加速器関連産業への参入可能性の高い企業データベース掲載企業
  - ・ コーディネーター訪問企業
  - ・ 個別商談会 面談企業
- ② 参入理由あるいは参入しない理由を明らかにすることにより、今後の施策の参考とする。
- ③ 参入理由から県内企業が置かれている状況を把握する。
- ④ 参入しない理由から参入障害を明らかにする。
- ⑤ 加速器関連産業に対するイメージを統計的に把握する。これにより、加速器関連産業に参入しようとする企業あるいは躊躇している企業に対し、情報提供を行う。
- ⑥ 事業の周知を行う。

### (2) 調査対象、方法

次のいずれかに該当するいわて産業振興センター登録企業 409 社（繊維工業を除く）にアンケート調査票を発送して調査（平成 26 年 6 月）。

- ① 県内登録企業の中で取引支援チームが作成した受注能力の高い企業（300 社）。
- ② 県内登録企業の中で発注登録（発注のみ希望する企業）企業（109 社）。

### (3) 意向調査結果概要

- ① 回答企業：103 社（回収率 25.2%：103 社／409 社）
- ② 分析結果
  - ・ 回答企業 103 社の加速器関連産業への参入について、「関心がある」が 68%（70 社/103 社）で最も高く、「わからない」24%（25 社/103 社）、「関心がない」8%（8 社/103 社）となっており、興味を持っている企業が多い。
  - ・ ただし、加速器関連部品の受注実績は、「ない」が 86%（89 社/103 社）と大半を占め、電気・半導体など他業界と比較した新規取引の可能性についての印象も「わからない」が 76%（78 社/103 社）で最も高く、求められる加工技術や精度など具体的な情報が少なく、調査時点では様子を見ている企業が多いことがうかがえる。
  - ・ また、関心があると回答した企業 70 社（複数回答数 211）の成果を上げるために必要と考える施策は、「受注可能性のある部品等情報の公開」が 25%（53/211）で最も高く、次いで「取引の支援」23%（49/211）、「共同受注など企業連携の促進」と「技術相談への対応」がそれぞれ 12%（26/211）等となっており、「受注可能性のある部品等情報の公開」や、共同受注体制の支援を含めた「取引の支援」を望んでいる企業が多いことがうかがえる。
- ③ 上記の調査結果から、次の取組みが求められていることが明らかになった。
  - ・ KEK や大手企業の加速器関連部品などの試作・開発ニーズや取引ニーズの把握。
  - ・ 県内企業の固有技術の把握と、KEK や大手企業の加速器関連部品などの試作・開発ニーズや取引ニーズの県内企業への情報提供。

- ・ 加速器関連に必要な要素技術や県内企業の参入可能性について報告会開催による情報提供。
- ・ 上記の報告会に併せて、KEK の研究者から ILC 関連装置の開発状況や加速器関連産業への参入に向けてモノづくり中小企業が求められる内容についてセミナー開催による情報提供。
- ・ 来年度以降も加速器関連の専門知識を有するコーディネーターを継続配置し、県内企業の加速器産業参入に向けた情報収集や情報提供・共有できる仕組みによる継続支援。

## 8 加速器関連産業への参入に向けた課題と提言

### (1) 加速器関連産業への参入に向けた課題

加速器には数多くの高度な先端技術が必要とされている。関連技術分野としては、高周波技術、ビーム制御技術、表面処理技術、超伝導技術、低温技術、高電圧技術、真空技術、制御技術、放射線管理技術、超精密加工先端技術など多数挙げられる。

(一社)日本電機工業会の調査報告<sup>1)</sup>によると図8.1に示すように、2008年の世界の加速器装置の累計設置台数は24,310台で、イオン注入装置とがん治療装置がそれぞれ40%（約1万台）を占め、年間販売金額は35.3億ドル（4,236億円：1\$=¥120）である。

用途		累計設置台数	年間販売台数	年間販売金額
工業用	イオン注入装置	10,000	500	1,400
	電子線&X線照射装置	2,075	75	130
	イオンビーム分析装置	225	25	30
	ラジオアイソトープ	610	60	70
	非破壊検査装置	750	100	70
	がん治療装置	9,600	500	1,800
	中性子発生装置	1,050	50	30
合計		24,310	1,310	3,530

出展:JEMA 北米並びにアジアにおける加速器の普及状況と将来展望調査

図8.1 加速器装置の設置台数と年間販売金額<sup>1)</sup>

ILCはまだ正式決定になっていないが、KEKでは正式決定を前提として様々な準備を進めており、参入を検討している県内企業もILCが正式決定してから参入を決めるのではなく、今の時期から正式決定を見越して取組みを進めていく必要がある。

県内企業がILC参入を目的に設備投資をしても、これのみでの投資回収は難しく、将来的な工業用加速器装置市場や医療機器市場への参入を見据えることが求められる。

また、ILCによって得られた最新先端技術は他の産業分野へ応用することが可能であり、新たな技術分野への挑戦として、将来への投資として考えることも必要である。

なお、県内企業にとって最初からILC関連機器やコンポーネントの開発・製造は現時点では極めて困難であり、単一部品加工・処理及びユニット化等から着手し、県内外他社との連携により関連機器やコンポーネントの製造を視野に入れて検討すべきである。

県内企業の加速器関連産業への参入には、各企業が自らの固有技術と立ち位置を再認識することが最優先であり、現在の主要製品と事業における自社の強みと弱み、自社事業の現状維持と事業拡大のバランスなどを踏まえて、ILC参入の可能性と企業の将来性を予測することが求められる。

東北放射光施設の中小企業へのニーズは、高度な固有技術を活用する数点程度の部品やユニットであろうと推測されるが、ILCのニーズではその施設規模から膨大な数量が期待される。自社の固有技術がILC機器・コンポーネントの何処で活かされるのか、改良・改善の余地はあるのかを知ることがスタートである。

ILC施設や機器・コンポーネント等は未だ研究途上のものも見られ、品質管理を含む量産技術の確立はこれからである。そのためには、ILCにおいて主導的な役割を担うKEKの研究者との信頼関係に基づく共同研究や改良技術の提案等、経営者の積極的な姿勢と取組みが重要である。

新技術分野はKEKや大学機関との連携強化、既存技術分野については(一社)先端加速器科学技術推進協議会(AAA)（8(4)参照）参画の大手企業との取引・参入のための具体策が必要である。

また、企業連携による参入の可能性を具現化するためにワーキンググループを編成し、具体的な事案検討・協議の場が必要である。

## (2) 加速器産業参入に向けた提言

### ① 情報収集・提供・共有のための仕組み

7章で示した県内企業のアンケート結果からも分かるように、ILC や加速器産業に関する情報が不足しており、情報を求めている企業が多い。このため、情報収集・提供・共有のためのプラットフォームとして「いわて加速器関連産業研究会(仮称)」の立ち上げが必要である。

また、研究会の立ち上げとともに、県内企業を直接訪問し、情報提供や KEK や大手企業とのマッチングのためのコーディネーターによる支援を強化する必要がある。

### ② 県内企業を KEK や AAA 参画大手企業等に紹介する仕組み

KEK は ILC の心臓部である加速空洞やクライオモジュールについては、一定の製造技術を確立しているものの、品質の安定化、コスト低減、量産技術確立に向けて更なる技術革新を目指している。KEK ではこれらの開発を進めるにあたって、積極的に共同研究に取り組む企業や企業グループを求めている。

また、加速空洞やクライオモジュール以外の施設・設備については、大手企業との取引も重要なとなる。

そのため、県内企業を KEK や AAA 参画大手企業に紹介するための仕組みとして、KEK を会場とし、KEK 職員や AAA 参画大手企業関係者を対象とした技術展示会の開催や KEK 職員を対象とした県内企業視察会の開催なども有効と考える。

### ③ 取引案件を知る仕組み

大手企業の取引案件については、いわて産業振興センターの取引支援機能の一環として、大手企業からの発注情報を収集し斡旋することが求められる。

また、KEK においても加速器等に関連した発注案件が存在しており、KEK との密接な関係を構築しながら発注案件の発掘に取り組む必要がある。

そのためには、ILC や加速器など施設・設備に専門的知識を有するコーディネーターをいわて産業振興センターに配置し、取引案件の発掘とマッチングを行う仕組みを構築する必要がある。

また、東経連ビジネスセンターが開設しているマッチングサイト「eEXPO」(7(5)参照)の活用も有効と考えられ、県内企業の積極的な登録が求められる。

### ④ 試作・開発案件を知る仕組み

KEK が発注する試作・開発案件を知るためには、KEK の研究者との密接な関係を構築することが必要であり、上述②の取組み等を通じて KEK との繋がりを強化し、KEK が発注する様々な加速器関連の試作・開発部品に積極的に対応する必要がある。

なお、県内企業が KEK 等と共同研究する場合、岩手県工業技術センターも共同研究に加わり、積極的に研究開発をサポートするとともに、必要に応じて、岩手県工業技術センターが KEK に職員を派遣するなどして、KEK の試作・開発案件のコーディネートを行うことが期待される。

### ⑤ 企業グループ(連携体)での参入に向けた仕組み

加速空洞やクライオモジュールといった主要部品に県内企業が単独で参入することは極めて困難なことから、県内外企業のグループ(連携体)による参入を検討する必要がある。KEK も共同受注対応を歓迎しており、そのためにも、KEK が発注する試作・開発案件に企業グループとして積極的に関わる必要がある。

KEK が現在検討中の課題に対応した連携体による取組みを加速させるため、今後立ち上げる「いわて加速器関連産業研究会(仮称)」の下に、必要に応じてテーマ毎のワーキンググループ(分科会)を立ち上げ、コーディネーターがサポートしながら取組みを進めていく必要がある。

### (3) 加速器産業参入に向けた取組方策(案)

上記に述べたことも含めて、今後必要となる取組み方策(案)をまとめると表8.1のとおりである。

表8.1 今後必要となる取組み方策(案)

ステージ	目的	項目	支援内容	相手先	対象設備等
建設前	情報収集・提供・共有	いわて加速器関連産業研究会(仮称)	◇産学官交流・連携の場 ◇セミナー・視察会開催等による情報収集・共有 ◇コーディネーターによる支援		
建設時	参入	取引支援(企業単独参入)	◇商談会開催(場所:KEK他) ◇個別マッチング ◇東経連ビジネスサイト活用	○KEK ○大手企業 ○AAA会員	□既存技術設備 □周辺設備 □構造物・構築物
		開発支援 共同受注支援	◇県内企業視察会(KEK他) ◇共同開発支援(KEK×企業) ◇グループ化支援(WG組成) ◇人材育成支援(企業→KEK) ◇人材派遣(工技セ→KEK)	○KEK ○大手企業 ○KEKと既に付き合いのある企業	□超伝導加速空洞 □クライオモジュール □関連開発部品 □関連工法改善
建設後	参入	メンテナンス 保守部品取引	◇建設時に関わっていることが必要	○中核研究拠点	□施設・設備全般
	試作開発	計測装置開発 制御装置開発	◇建設時に関わっていることが必要	○中核研究拠点	□計測装置 □制御装置

### (4) (一社)先端加速器科学技術推進協議会(AAA)とは

政・官・産・学の連携役となり、日本が世界に誇る最先端技術を更に高め「量子加速器」とその利用技術を開発することにより、宇宙・素粒子・物質・生命分野における人類の知を広げると共に、医療・エネルギー・環境問題など世界規模の課題への新しい対応を可能とすべく、次の活動を展開している。

- シンポジウム、講演会などの各種イベントやインターネット等のメディアを通じて、先端加速器技術の可能性や意義を広く国内外に発信すること。
- 外部有識者等を交えた部会活動を組織して、「国際リニアコライダー(ILC)計画」をモデルとした知財の適切な取扱いや技術開発の方向性を検討し、関連組織への提言等を行うこと。
- 産・官・学の連携により、幅広い産業分野のものづくり技術を結集して、先端加速器を支える革新的科学技術を創出すること

一般会員:企業100社(会費年額100,000円)、特別会員:大学等40機関(会費は無料)が加入し、岩手県から的一般会員は現時点では見られないが、岩手大学と岩手医科大学が特別会員である。また、東北ILC推進協議会も特別会員である<sup>2)</sup>。

県内企業が自らの固有技術で大手企業との取引機会を得る場として、次年度設立予定の「いわて加速器関連産業研究会(仮称)」とAAAとの関係構築は重要戦略のひとつである。

### (5) 東経連ビジネスセンター 製造業マッチングサイト「eEXPO」とは<sup>3)</sup>

#### ① eEXPO

「eEXPO」では、登録画面に沿って入力すれば、自社が保有する技術・製品・サービスを分かりやすく整理して紹介することができる。さらに、表現の仕方が分からないという企業には、「eEXPO」が本格的なPRページを代行登録する。

200を超える業界数から、更に数万に及ぶ関連カテゴリーに登録することが可能であり、数多

くの関連カテゴリーから自社をアピールできるだけでなく、狙ったユーザーに対してピンポイントにアピールすることができる。自社を高く評価してくれる機関や個人から客観的に評価・推薦され、バックアップを受けられるよう「推薦機能」も用意した。これにより自社の信頼性、信用力向上を図り、推薦されるほどアクセスされやすくなるので認知度アップも期待出来る。

登録された製品・技術・サービスは数万に及ぶ業界のカテゴリーに出展されているので、最適なパートナーを詳細まで絞り込んで探すことが出来る。

## ② 加速器DBにおける技術分類

東経連ビジネスセンター製造業マッチングサイト「eEXPO」加速器バリューチェーンでは、吉岡正和客員教授（東北大学、岩手大学）の協力を得て、加速器関連産業の要素技術を分析し明らかにしている（表8.2）。

表8.2 ILCの要素技術<sup>4)</sup>

<b>材 料</b>	金属(Nb, Ti, Al, SUS), 非金属(セラミックス, フェライト), 特殊材料
<b>加工技術</b>	機械加工(切断, 切削, 成形), 接合(EBM, LBM, TIG, HIP, 拡散接合), 熱処理, 表面処理(化学研磨, 電解研磨, 洗浄)
<b>主要機器</b>	高周波機器(大電力・低電力部品), 真空機器(真空ポンプ, 診断・制御機器), 計測器(オシロスコープ), 制御(コンピューター, 制御回路, 制御配線)
<b>周辺機器</b>	機械(クレーン, エレベーター), 液体He設備(製造装置, 輸送配管, 貯蔵), 冷却水設備(ポンプ, 配管, 冷却塔, 制御), 通信設備(ケーブル, 通信装置), 電力設備(変電機器, 送配電機器), エネルギー設備(発電設備, 熱回収), 省エネ関連(照明, 空調, EMS)
<b>役 務</b>	輸送・据付(精密重量機器), アライメント(精密位置決め), 配線(電力配線, 制御線配線), 配管(配管部品, 現地工事), 土木・建築
<b>維持管理</b>	機器の監視及び操作, 維持管理, 保守点検

## ③ 「eEXPO」登録企業（2015年3月5日現在）

東経連ビジネスセンターは東北6県+新潟県で企業に対して、eEXPOの案内と登録テンプレートを送付し、東北地域加速器関連産業集積コーディネーターがeEXPOへの登録をよびかけている。岩手県内企業は下記の15社がeEXPOへ登録済みである。

株佐原、千田精密工業株、株YDK メカトロニクス、株YKK コミュニケーションズ、株クライン岩手事業所、岩手製鉄株、株オイカワ製作所、株小山田工業所、野村産業株岩手工場、株WING、株東亜電化、鈴木機械株、株ピーアンドエーテクノロジーズ、株パターンアート研究所花巻事業所、筑波ダイカスト株遠野工場

さらなる登録済み企業の掘り起しが必要であり、県内企業にも積極的にアピールする姿勢が必要である。

## 出典資料

- 1) 日本電機工業会“北米並びにアジアにおける加速器の普及状況と将来展望調査”，一般社団法人日本電機工業会加速器専門委員会, 2010年3月
- 2) 一般社団法人先端加速器科学技術推進協議会 HP
- 3) eEXPOHP : eEXPOとは
- 4) eEXPOHP : 加速器



---

岩手県 委託事業

平成 26 年度

「加速器製造に関わる要素技術の分析及び県内企業の加速器産業への参入可能性調査業務」

**調査報告書**

---

平成 27 年 3 月 30 日 編集・印刷  
公益財団法人 いわて産業振興センター  
〒020-0857 岩手県盛岡市北飯岡 2-4-26  
TEL 019-631-3825

---