

国際リニアコライダー（ILC）計画に関する技術的・経済的
波及効果及び世界各国における素粒子・原子核物理学分野に
おける技術面を含む研究動向に関する調査分析
報告書

平成 27 年 3 月

株式会社 野村総合研究所

はじめに

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

文部科学省では、日本学術会議の回答を踏まえ、今後2～3年をかけて ILC 計画の実施の可否判断に資する調査検討を行っていくところであり、平成26年度においては、重要事項として指摘のあった、「技術的・経済的波及効果」「世界各国における素粒子・原子核物理学分野の将来構想等」について、調査・分析を実施する。

具体的には、ILC 計画において用いられる加速器の製作技術が、過去の技術の波及も踏まえ、今後の社会でどのような形で利活用され、また、どのような効果が期待されるか、技術的な展開・波及事例などの有益な情報について調査・分析するとともに、それによる経済波及効果をまとめることとする。

また、併せて、素粒子・原子核物理学分野において、現在及び今後20年での米欧亜主要各国の目指そうとする研究計画を調査し、研究計画及びその期待する成果をどのように各国の政策に位置付けているか等について調査・分析することとする。

なお、本調査・分析の実施に際しては、加速器、素粒子・原子核物理学、経済分析等の分野の研究者や有識者による「国際リニアコライダー計画に関する調査分析検討委員会」を設置し、調査・分析結果や報告書の内容についてご検討いただいた。

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

また、国内外のインタビュー調査には、素粒子物理学、加速器の専門家の方々にご同行いただいた。

専門家の皆様には、インタビュー調査へのご支援をいただきましたことを、深く感謝申し上げます。

「国際リニアコライダー計画に関する調査分析検討委員会」委員名簿

(五十音順)

	氏名 (敬称略)	所属・役職
委員	大井川 宏之	日本原子力研究開発機構 戦略企画室 次長
委員	上垣外 修一	理化学研究所加速器基盤研究部 部長
委員	川越 清以	九州大学先端素粒子物理研究センター センター長
委員長	熊谷 教孝	高輝度光科学研究センター 専務理事
委員	熊田 幸生	住友重機械工業株式会社 執行役員
d委員	多田 栄介	日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所 副所長
委員	野田 耕司	放射線医学総合研究所 重粒子医科学センター・物理工学部 部長
委員	早見 均	慶應義塾大学商学部 教授
委員	福嶋 健二	東京大学理学部物理学科 准教授
委員	三和田 靖彦	トヨタ自動車株式会社 計測技術部 主査
委員	森 俊介	東京理科大学工学部経営工学科 教授

国内外インタビュー調査同行専門家名簿

(五十音順)

	氏名 (敬称略)	所属・役職
専門家	鎌田 進	高エネルギー加速器研究機構 名誉教授
専門家	久野 良孝	大阪大学大学院理学研究科物理学専攻 教授
専門家	三原 智	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 教授

インタビュー調査ご協力への謝辞

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

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

【政府機関】

国名	政府機関名
ドイツ	■連邦教育科学技術省 BMBF: Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
フランス	■CNRS/IN2P3 国立科学研究センター/国立原子核・素粒子物理研究所 CNRS: Centre national de la recherche scientifique IN2P3: National institute of nuclear and particle physics ■CEA/IRFU 原子力・代替エネルギー庁/宇宙基礎科学研究所 CEA: Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
英国	■科学技術施設庁 STFC (Science and Technology Facilities Council)
米国	■エネルギー省科学局 DOE: U.S. Department of Energy Office of High Energy Physics
カナダ	■カナダ自然科学・工学研究会議 NSERC: Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada

【主要研究機関】

国名	研究機関名
ドイツ	■ドイツ電子シンクロtron研究所 DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron)
スイス	■欧州合同原子核研究機関 CERN (European Organization for Nuclear Research)
フランス	■線形加速器研究所 LAL (Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire) ■宇宙基礎科学研究所 IRFU (Institute of Research into the Fundamental Laws of the Universe)
英国	■コッククロフト研究所+ジョンアダムス研究所 Cockcroft Institute, John Adams Institute
米国	■フェルミ国立加速器研究所 FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory <Fermilab>) ■SLAC国立加速器研究所 SLAC National Accelerator Laboratory ■アルゴンヌ国立研究所 ANL (Argonne National Laboratory)
カナダ	■TRIUMF国立研究所 TRIUMF (Canada's national laboratory for particle and nuclear physics)
中国	■中国科学院高能物理研究所 IHEP (Institute of High Energy Physics)
日本	■高エネルギー加速器研究機構 KEK (High Energy Accelerator Research Organization)

【加速器関連企業】

国名	企業名
ドイツ	RI Research Instruments GmbH Babcock Noell GmbH
フランス	Thales Electron Devices Air Liquide ALSYMEX
米国・カナダ	Communications & Power Industries, LLC Pavac Industries Inc.
日本	三菱重工業株式会社 三菱電機株式会社 日本高周波株式会社 株式会社アルバック

目 次

I. 技術的・経済的波及効果の検討.....	1
1. 加速器の技術等に関する資料の整理、調査・分析.....	1
1) 過去 10 年における加速器の需要の推移.....	2
2) 加速器を利用する産業の分布.....	15
3) 加速器等の開発に伴う技術の他産業へ与えた影響・波及効果の実態.....	17
4) ILC の概要及び実現に必要な技術・機器の体系.....	34
5) ILC 製作がもたらす次世代の産業向け加速器の方向.....	66
6) ILC 実現がもたらす新しい加速器関連機器（検出器）の方向.....	78
7) ILC 製作における量産化技術の工業的応用.....	86
2. 加速器技術の発展性等に関するインタビュー現地調査.....	96
1) インタビュー対象機関.....	96
2) インタビュー調査項目.....	97
3) インタビュー調査結果.....	98
3. 経済波及効果の推計.....	114
1) 経済波及効果推計の枠組み.....	114
2) ILC の「建設・活動による経済波及効果」の推計.....	117
3) ILC の「技術開発による経済波及効果」の推計.....	132
4) ILC の経済波及効果推計結果のまとめ.....	140
5) 先端加速器技術が社会・産業全体にもたらす効果の検討.....	142
II. 世界各国における素粒子・原子核物理学分野の将来構想等の調査・分析.....	147
1. 素粒子・原子核物理学分野の研究を所管する各国政府機関への調査.....	147
1) インタビュー対象機関.....	147
2) インタビュー調査項目.....	148
3) インタビュー調査結果.....	149
2. 素粒子・原子核物理学分野における各国主要研究機関への調査.....	153
1) インタビュー対象機関.....	153
2) インタビュー調査項目.....	153
3) インタビュー調査結果.....	154
3. 各国の素粒子・原子核物理学分野の将来構想等の取りまとめと ILC への示唆.....	162
1) 各国の素粒子・原子核物理学分野の将来構想等の取りまとめ.....	162
2) 各国政府・研究機関へのインタビュー調査から得られる ILC への示唆.....	171

I. 技術的・経済的波及効果の検討

第 I 章では、ILC 計画で用いられる加速器の技術に関して、以下の 1～3 の調査項目に沿って、文献による調査やインタビュー等現地調査を実施しつつデータを整理するとともに、その結果を踏まえて、経済波及効果を算出する。

1. 加速器の技術等に関する資料の整理、調査・分析

加速器の形状や大小にとらわれず、日本、米国、ドイツ、フランスにおける加速器の動向について、現地研究機関実施の既往調査や統計等の文献等により情報を整理し、分析する。

なお、本調査における加速器の定義は、以下のとおりとする。

加速器とは、

「水素の原子核である陽子や、電子などの小さな粒子を光の速度近くまで加速し、高いエネルギーの状態にする装置」

(出典：総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科ホームページ掲載情報、
<http://accl.kek.jp/sokendai/kasokuki.html>)

「電気を持った電子や陽子、または原子から電子をはぎ取ったイオンなどを荷電粒子といい、そのような荷電粒子を電磁力によって加速する装置」

(出典：「加速器の基礎」2013 年 3 月、一般社団法人 日本電機工業会加速器特別委員会)



本調査における加速器の定義は、「電気を持った電子や陽子、または原子から電子をはぎ取ったイオンなどの荷電粒子を電磁力によって光の速度近くまで加速し、高いエネルギーの状態にする装置」とする。

なお、加速器には、直流加速器、交流加速器、直線型加速器、円形加速器、静電加速器、線型加速器、サイクロトロン、シンクロトロン、衝突型加速器、蓄積リングなどの種類（分類）がある。(出典：「加速器の現状と将来」平成 16 年 4 月、原子力委員会 研究開発専門部会加速器検討会)

1) 過去 10 年における加速器の需要の推移

日本及び世界各国における加速器の生産・販売・稼働台数等の動向を、概ね過去 10 年（2000 年以降）にわたり整理する。

(1) 日本国内の加速器販売・稼働状況の整理

日本の加速器の需要（生産、販売、稼働等）については、以下の文献・統計をもとに実態を把握する。

図表 I・1 日本の加速器の需要調査のための文献・統計と利用方法

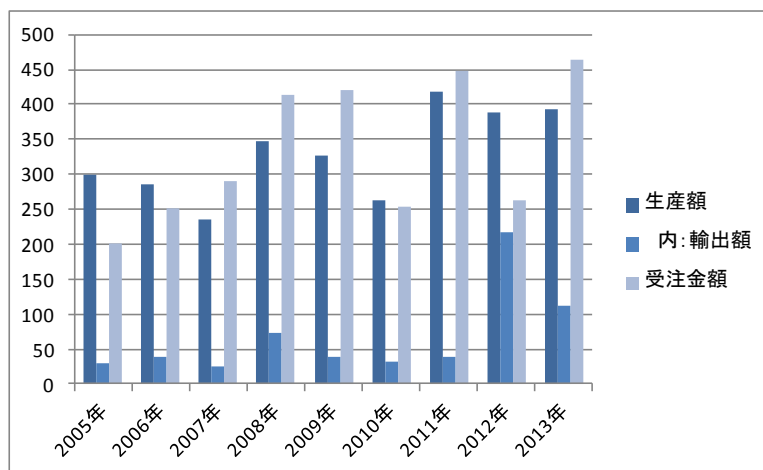
対象	文献・統計タイトルと実態把握方法
日本	<p>■ 「JEMA 自主統計：加速器関係統計」日本電機工業会、2012 年（最新）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本の加速器及び関連製品に関する生産金額、輸出金額、受注金額等について、統計対象会社の合計額としてとりまとめた統計。 ・統計参加会社：(株)NHV コーポレーション、住友重機械工業(株)、(株)東芝、東芝電子管デバイス(株)、ニチコン(株)、(株)日立パワーソリューションズ、(株)日立製作所、日立造船(株)、三菱重工業(株)、三菱電機(株) ・統計期間は、2005 年～2012 年
	<p>■ 「放射線利用統計」日本アイソトープ協会、2013 年（最新）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・放射線源として、「ラジオアイソトープ (RI)」または「放射線発生装置」の利用を行っている事業所に関する統計。 ・放射線発生装置には、サイクロトロン、シンクロトロン、シンクロサイクロトロン、直線加速装置、ベータトロン、ファン・デ・グラーフ型加速装置、コッククロフト・ワルトン型加速装置、その他荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置が含まれる。
	<p>■ 「工業統計表（品目編）」経済産業省、平成 24 年（最新）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・加速器産業は、日本標準産業分類上「296 電子応用装置製造業」（小分類）に含まれる。「電子応用装置製造業」は、複数の細分類業種から構成される。 ・本調査では、工業統計表を用いて、細分類項目別に、加速器の生産・出荷額を把握する。

①「加速器関係統計」にみる日本企業の加速器の生産・輸出・受注の実態

日本電機工業会公表の加速器関係統計によれば、日本企業の加速器の生産額は、2013年で392億円/年、うち輸出額は113億円である。2009年のリーマンショック後の落ち込みから回復し、2011年以降は増加基調にある。

また、世界の加速器システム販売額に占める日本企業の受注額のシェアは、2011年で7.5%となっている。

図表 I - 2 日本企業の加速器の生産・輸出・受注額の推移



	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
生産額	300	286	236	347	326	263	417	389	392
内:輸出額	29	38	26	74	39	31	38	216	113
受注金額	201	252	291	414	420	254	448	263	464

■生産・輸出・受注額は産業用、研究用、サービスの合計値

■輸出額は生産額の内数

■統計参加会社: (株)NHVコーポレーション、(株)神戸製鋼所、住友重機械工業(株)、(株)東芝、東芝電子管デバイス(株)、ニチコン(株)、(株)日立パワーソリューションズ、(株)日立製作所、日立造船(株)、三菱重工業(株)、三菱電機(株)

* 2006年度まで川崎重工業(株)、2009年度まで(株)IHI、2011年度まで(株)神戸製鋼所を含む。
2011年度から日立造船(株)が参加。

(出所)一般社団法人 日本電機工業会 加速器特別委員会資料

図表 I - 3 日本企業の加速器受注額の対世界シェアの推移

(億円)

	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
日本企業の生産額	300	286	236	347	326	263	417	389	392
<内:輸出額>	29	38	26	74	39	31	38	216	113
日本企業の受注金額 (A)	201	252	291	414	420	254	448	263	464
世界の加速器システム販売額 (B)	N.A.	N.A.	4,784	5,050	5,332	5,632	5,950		
日本企業の対世界シェア (A/B)			6.1%	8.2%	7.9%	4.5%	7.5%		

(注1) 日本の加速器の生産・輸出・受注額について

■生産・輸出・受注額は産業用、研究用、サービスの合計値

■輸出額は生産額の内数

■統計参加会社: (株)NHVコーポレーション、(株)神戸製鋼所、住友重機械工業(株)、(株)東芝、東芝電子管デバイス(株)、ニチコン(株)、(株)日立パワーソリューションズ、(株)日立製作所、日立造船(株)、三菱重工業(株)、三菱電機(株)

* 2006年度まで川崎重工業(株)、2009年度まで㈱IHI、2011年度まで㈱神戸製鋼所を含む。

2011年度から日立造船(株)が参加。

(出所)一般社団法人 日本電機工業会 加速器特別委員会資料

(注2) 世界の加速器システムの販売額について

■2007年の出典: "The impact of CERN on high tech industry developments" CERN, 2011

■2008年の出典: 「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報告書」社団法人日本電機工業会、2010年3月
ただし、2008年の「電子溶接・切断」については2007年の実数をもとに推計

■2009～11年は、2007年～08年の加速器システム数増加率をもとに推計

②「放射線利用統計」にみる放射線発生装置数の推移

「放射線利用統計」（日本アイソトープ協会）によれば、国内において使用許可を得ている放射線発生装置の数は、2013年3月末現在、1,595台である。内訳は、直線加速装置1,201台、サイクロトロン212台、コッククロフト・ワルトン加速装置73台、シンクロトロン40台などとなっている。

また、直近10年間で増加しているのは、直線加速装置とサイクロトロンで、年間40台程度の新規需要が発生している。さらに、放射線発生装置の設置機関をみると、医療機関が全体の75%と大きなシェアを占めている。

以上より、我が国で稼働している放射線発生装置（加速器）の中心は、医療用途の直線加速装置（医療用リニアック）、及びサイクロトロン（PET、陽子線治療装置等）であり、年間40台程度の新規需要が発生している。

医療用加速装置（医療用リニアック）の価格を3億円/台¹、サイクロトロンの価格を5億円/台²とすると、年間155億円（3億×30台+5億×13台）程度の需要額になっていると推測される。

図表 I-4 国内で使用許可を得ている放射線発生装置数の推移

発生装置	2003年	2008年	2013年	2003-13年
	実数	実数	実数	増加台数
サイクロトロン	86	198	212	126
シンクロトロン	28	28	40	12
シンクロサイクロトロン	0	2	0	0
直線加速装置	898	1,042	1,202	304
ベータトロン	9	4	3	△6
ファン・デ・グラーフ加速装置	41	40	38	△3
コッククロフト・ワルトン加速装置	84	82	73	△11
変圧型加速装置	15	17	17	2
マイクロトロン	32	19	9	△23
プラズマ発生装置	1	1	1	0
合計	1,194	1,433	1,595	401

（出所）「放射線利用統計」日本アイソトープ協会

¹ 「がん治療を支えるチーム医療：診療放射線技師」 熊谷孝三著、日本放射線技師会出版会、2009

² 最近の政府調達落札価格事例より。サイクロトロンカスケード装置一式9億37万5千円、PETサイクロトロン&RI合成システム一式5億7,225万円、医療診断用サイクロトロン装置一式4億950万円、PET用サイクロトロン合成装置一式4億845万円

図表 I - 5 放射線発生装置の機関別使用許可台数 (2013 年)

(2013年3月31日現在)

発生装置	総数		医療機関	教育機関	研究機関	民間企業	その他の機関
	実数	構成比	実数	実数	実数	実数	実数
サイクロトロン	212	13.3%	143	4	23	39	3
シンクロトロン	40	2.5%	9	3	23	4	1
シンクロサイクロトロン	0	0.0%	0	0	0	0	0
直線加速装置	1202	75.4%	1,024	25	55	65	33
ベータトロン	3	0.2%	0	1	2	0	0
ファン・デ・グラフ加速装置	38	2.4%	0	14	23	1	0
コッククロフト・ワルトン加速装置	73	4.6%	0	16	27	30	0
変圧型加速装置	17	1.1%	0	0	9	8	0
マイクロトロン	9	0.6%	4	3	2	0	0
プラズマ発生装置	1	0.1%	0	0	1	0	0
合計 (実数)	1,595	100.0%	1,180	66	165	147	37
(構成比)	100.0%		74.0%	4.1%	10.3%	9.2%	2.3%

(出所)「放射線利用統計 2013」日本アイソトープ協会

③「工業統計」にみる広義の加速器の出荷額の推移

「工業統計」（経済産業省）では、広義の加速器は、産業細分類上「2961 X線装置製造業」、「2962 医療用電子応用装置製造業」、「2969 その他の電子応用装置製造業」に含まれる。品目分類上はさらに細分化されているが、「加速器」の品目はない。

広義の加速器本体が含まれる品目は、医療用 X線装置、産業用 X線装置、医療用電子応用装置、電子顕微鏡、他に分類されない電子応用装置などである。

これらの品目の出荷額合計をみると、2012 年で 5,300 億円程度の出荷額となっている。直近 5 年では、出荷額はマイナス 3,000 億円と大きく減少している。その中で、産業用 X 線装置のみは増加基調にあることから、産業における加速器（X 線装置等）の需要が高まっていると推測される。

図表 I - 6 広義の加速器関連品目の出荷額の推移（工業統計ベース）

分類コード	品目	出荷金額 (百万円)					出荷増減額 (百万円)
		2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	
296111	医療用X線装置 ★	236,412	185,913	200,206	136,001	185,080	▲ 51,332
296112	産業用X線装置 ★	50,451	57,117	58,732	65,659	64,389	13,938
296113	X線装置の部分品・取付具・附属品	73,124	52,584	53,820	66,888	23,200	▲ 49,924
296211	医療用電子応用装置 ★	184,394	150,937	158,317	178,536	144,173	▲ 40,221
296212	医療用電子応用装置の部分品・取付具・附属品	23,809	29,813	33,723	33,310	23,633	▲ 176
296912	高周波電力応用装置	36,287	23,314	19,288	22,439	18,948	▲ 17,339
296913	電子顕微鏡	95,547	63,758	99,278	83,599	108,940	13,393
296919	他に分類されない電子応用装置 ★	368,830	233,092	255,698	179,227	140,815	▲ 228,015
296929	その他の電子応用装置の部分品・取付具・附属品	176,868	123,034	110,720	91,100	100,354	▲ 76,514
上記品目のうち、加速器本体が含まれる品目(★)の合計		840,087	627,059	672,953	559,423	534,457	▲ 305,630
上記品目の合計		1,245,722	919,562	989,782	856,759	809,532	▲ 436,190

(出所)平成24年工業統計表「品目編」データ（平成26年 3月28日公表）

(参考)「296 電子応用装置製造業」に含まれる加速器関連該当業種

細分類項目	主な該当業種（品目）の例示
2961 X線装置製造業	産業用 X線装置、医療用・歯科用 X線装置、X線探傷機、CT スキャナ 等
2962 医療用電子応用装置製造業	医療用粒子加速装置、医療用放射性物質応用装置等
2969 その他の電子応用装置製造業	電子応用測定装置、サイクロトロン、放射線応用計測器、レーザー装置、高周波電力応用装置、電子顕微鏡 等

④日本国内の加速器の需要実態（まとめ）

以上の加速器に関わる異なる3種類の統計数字、すなわち、「加速器関係統計」、「放射線利用統計」及び「工業統計」の数字の相互関係性を明らかにし、全体を総合化する形で、日本国内の加速器の生産・販売・設置等の実態を取りまとめると次のとおりである。

我が国の直近の加速器の市場規模は、年間400億円程度（加速器関係統計）であり、うち医療用加速器（リニアック及びサイクロトロン）が155億円で4割程度を占めている（放射線利用統計をもとに推計）と推測される。

この市場規模は、加速器が品目として含まれる「電子応用装置製造業」の対応細分類項目の直近の出荷額5,300億円に対して、7.5%を占めている。

(2) 世界の加速器販売・稼働状況の整理

世界の加速器の需要（販売状況）については、以下の文献・統計をもとに実態を把握する。

図表 I-7 世界の加速器需要（販売状況）の調査のための文献・統計と利用方法

対象	文献・統計タイトル
世界 全体	■ 報告書「CERN のハイテク産業の発展への影響効果」 “The impact of CERN on high tech industry developments” CERN, 2011
	■ 報告書「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」 日本電機工業会、2010年3月
	■ 調査レポート「ビームビジネス：産業に利用される加速器」 “The beam business: Accelerators in industry” Physics Today Vol.64 No.6, 2011
	■ 報告書「アメリカの未来に向けた加速器」 “Accelerators for America’ Future” U.S. Department of Energy, 2011
	■ 調査報告「産業用加速器とその応用によるビームビジネス」 “Introduction to the Beam Business” in Industrial Accelerators and their Applications (World Scientific, Singapore, 2012), Robert W. Hamm and Marianne E. Hamm, Eds.,
欧米 各国	■ 欧米各国（米国、ドイツ、フランス等）における関連調査結果、工業統計

①世界全体の動向

ア) CERN 調査

CERN が 2011 年に公開した調査結果 “The impact of CERN on high tech industry developments” において、以下の点が示されている。

- 2007 年現在世界で、27,500 台の加速器が稼働中。そのうち、200 台程度が研究用で残りは産業、医療用である。
- 加速器の経済的インパクトは、加速器製品及び加速器システムの初期資本投資額の 100～1000 倍に及んでいると推測される。
- 産業用加速器ビームを使って加工、処理、検査された全最終製品は、全世界で年間 500 億ユーロ以上に達している。市場成長率は、年間 10%以上となっている。

図表 I - 8 世界の加速器稼働数（2007年）

分野	システム数合計	年間販売件数	年間販売額 百万ユーロ	システム価格 百万ユーロ
がん治療	9,100	500	1,800	2.0 ~ 5.0
イオン注入	9,500	500	1,400	1.5 ~ 2.5
電子溶接・切断	4,500	100	150	0.5 ~ 2.5
電子線・エックス線照射	2,000	75	130	0.2 ~ 8.0
ラジオアイソトープ	550	50	70	1.0 ~ 30.0
非破壊検査	650	100	70	0.3 ~ 2.0
イオン分析	200	25	30	0.4 ~ 1.5
中性子発生装置	1,000	50	30	0.1 ~ 3.0
合計	27,500	1,400	3,680	

（出所）“The impact of CERN on high tech industry developments” CERN、2011

イ) 日本電機工業会調査

社団法人日本電機工業会が2010年3月に公表した調査結果「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」では、世界における加速器装置の設置状況について以下の点が示されている。

- 2008年現在世界における加速器応用装置の累計設置台数は、24,310台である。
- 主なものは、イオン注入装置10,000台、がん治療装置9,600台、電子線&X線照射装置2,075台などである。

なお、この調査では、上記CERN調査で対象となっている「電子溶接・切断」装置は対象となっていない。仮にCERN調査に示される4,500台（2007年）を加えると、2008年現在の世界の加速器累計設置台数は、約28,800台程度になる。

図表 I - 9 世界の加速器装置の販売台数&設置台数（2008年）
（台）

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

出所: Reviews of Accelerator Science and Technology vol.1(2008), Robert W.Hamm: Industrial Accelerators をベースにヒアリングを実施。矢野経済研究所作成

（出典）「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報告書 概要版」2010年3月
社団法人 日本電機工業会 加速器専門委員会

ウ) ビームビジネス調査

米国の調査レポート「ビームビジネス：産業に利用される加速器」(2011年)³によれば、世界の加速器の動向として以下の点が示されている。

- 過去 60 年間に全世界で 3 万台以上の加速器が製造された。そのうち、半数以上が産業用加速器であり、その年間製造数は、医学治療用、研究用加速器のほぼ 2 倍の量に達している。
- 世界では、サイクロトロン (650 台) と線形加速器が運転中。そのほとんどが部分的には放射性同位体の製造に使われている。
- 産業用加速器の製造会社は、毎年 1 千台のシステムを生産。その販売額は、全世界で 20 億ドル程度になっていると推測される。
- 通常、新型加速器の実用的な利用方法は、発明後まもなく詳細に調べられるものの、産業ツールとして広く認識・普及されるのに 10 年単位の時間がかかることもある。例えば、半導体へのイオン注入技術が提案されたのは 1950 年代であるが、産業用技術として広く受容されたのは 1970 年代になってからである。

図表 I - 10 電子ビーム照射・加工の応用領域と製品例

市場	金額	応用領域	製品
電子ビーム照射	年間 900 億ドル (全世界)	プラスチック、エラストマー、高分子の架橋形成	耐熱性ケーブル絶縁物 食品包装用の熱縮フィルム 自動車内装用発泡ポリエチレン タイヤのゴム、インキ、塗装・接着剤、傷治療用ゲル 等
電子ビーム加工		材料に正確に熱エネルギーを加える 精密溶接、切断、穿孔、ロウづけ、つや出し、表面硬化	航空機、自動車、研究機器部品等の生産ラインで利用

(出所) 「ビームビジネス：産業に利用される加速器」(2011年) の記載内容より

³ Robert W. Hamm and Marianne E. Hamm, “The beam business: Accelerators in industry” Physics Today Vol.64 No.6, 2011

エ) 米国エネルギー省調査

米国エネルギー省が2010年に公表した報告書「アメリカの未来に向けた加速器」⁴の中で、世界の加速器の動向について以下の記述がある。

- 世界の医学用・産業用加速器の市場は、現在年間35億ドル超となっている。また、それは毎年10%以上で成長している。
- すべてのデジタル・エレクトロニクス産業は、現在イオン注入を粒子線に依存している。その結果、毎年15億ドルのイオンビーム加速器の市場が形成されている。
- 粒子線によって処理されるか、扱われるか、検査される製品は、全体で年間5,000億ドル以上の金額に達している。

オ) 世界の加速器稼働実態のまとめ

以上の各種調査結果をもとに、世界の加速器稼働数の実態を推測すると以下のとおりとなる。世界の加速器稼働数は、2007年で27,500台、2008年で28,910台とそれぞれ推計されている。単純に比較はできないが、分野別の増加数をみると、工業分野（非破壊検査、イオン分析、ラジオアイソトープ）、医療分野（がん治療）が相対的に伸びていると推測される。

図表 I - 11 世界の加速器稼働数の推移（2007-08年）

分野		システム数				システム年間販売額	1システム当り販売平均単価
		実数		増加数	増加率	百万ユーロ	万ユーロ
		2007年 ①	2008年 ②	2007-8年 ③=②-①	2007-8年 ③/①	2007年 ④	2007年 ④/①
医療分野	がん治療	9,100	9,600	500	5.5%	1,800	19.8
工業分野	イオン注入	9,500	10,000	500	5.3%	1,400	14.7
	電子溶接・切断	4,500	4,600	100	2.2%	150	3.3
	電子線・エックス線照射	2,000	2,075	75	3.8%	130	6.5
	ラジオアイソトープ	550	610	60	10.9%	70	12.7
	非破壊検査	650	750	100	15.4%	70	10.8
	イオン分析	200	225	25	12.5%	30	15.0
その他	中性子発生装置	1,000	1,050	50	5.0%	30	3.0
	合計	27,500	28,910	1,410	5.1%	3,680	13.4

(注1) 2007年の出典: "The impact of CERN on high tech industry developments" CERN, 2011

(注2) 2008年の出典: 「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報告書」社団法人日本電機工業会、2010年3月
ただし、2008年の「電子溶接・切断」については2007年の実数をもとに推計

⁴ "Accelerators for America's Future" U.S. Department of Energy, 2011

②各国別の動向

加速器の生産・利用がさかんな、米国、ドイツ、フランス、イギリスにおける加速器関連の産業分類ベース（世界共通の産業分類コードの「照射、電気医療及び電気療法装置製造業」を対象）での出荷額額の動向をまとめると以下のとおりである。

統計に限界があるため厳密な加速器関連出荷額は捉えられないが、加速器が含まれる業種単位でみる限り、最近（2008～11年）では米国、ドイツは減少し、フランス、イギリスは増加している。欧米日のシェア（2008年）は、米国67%、日本24%、欧州9%である。

図表 I - 12 各国別の加速器関連産業の出荷額の動向

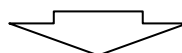
【国連統計ベース】

国	産業分類	単位	2000年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
米国	照射、電気医療 及び電気療法装置製造業	10億US\$		39.2					
ドイツ		百万ユーロ		3130	2906	2589	2589		
フランス		百万ユーロ		1303	1200	1339	1730		
英国		百万ポンド		178	726	1056	990		
日本		10億円		1694	1172	1488			

【各国統計ベース】

国	産業分類	単位	2000年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
米国	照射、電気医療 及び電気療法装置製造業	10億US\$	17.2	31.9	29.4	31.2	31.5		
ドイツ		百万ユーロ	2,158	2,965	2,558	2,589	2,570	2,510	2,454
フランス			745	1,015	936	1,339	1,281	1,307	1,318
日本		10億円	1,632	1,601	1,089	1,261	1,184	1,039	

（2015年3月18日の為替レートで円換算）



【国連統計ベース】

国	産業分類	単位	2000年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2008-11年 増加額	2008年 構成比
米国	照射、電気医療 及び電気療法装置製造業	10億円		4,743							67.4%
ドイツ				401	372	331	331			-69	5.7%
フランス				167	154	171	221			55	2.4%
英国				32	130	189	177			145	0.5%
日本				1,694	1,172	1,488				-1,694	24.1%
小計			7,036							100.0%	

【各国統計ベース】

国	産業分類	単位	2000年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2008-11年 増加額
米国	照射、電気医療 及び電気療法装置製造業	10億円	2,086	3,856	3,562	3,780	3,810			-46
ドイツ			276	380	327	331	329	321	314	-51
フランス			95	130	120	171	164	167	169	34
日本			1,632	1,601	1,089	1,261	1,184	1,039		-417

■ 米国における加速器関連製造業の出荷額の推移

提供機関	調査名または資料名	国	産業分類	コード	TITLE	TITLE (日本語)	単位	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年
U.S. Census Bureau	(2002年～2011年) Annual Survey of Manufactures (2000年～2001年) Economic Census of the United States	米国	2007 NAICS US	334517	Irradiation apparatus manufacturing	照射装置製造業	\$1,000	4,329,236	4,324,647	4,775,887	4,619,802	6,988,162	6,403,725	6,152,993	10,763,402	6,288,330	6,011,228	5,922,284	6,066,418
				334510	Electromedical and Electrotherapeutic Apparatus Manufacturing	電気医療および電気療法装置製造業	\$1,000	12,909,458	13,642,648	15,493,017	16,342,672	17,501,197	14,260,446	14,299,437	25,719,435	25,582,245	23,430,037	25,319,398	25,424,602
				ISIC「2660」に対応するNAICS業種の合計		\$1,000	17,238,694	17,967,295	20,268,904	20,962,474	24,489,359	20,664,171	20,452,430	36,482,837	31,870,575	29,441,265	31,241,682	31,491,020	

■ ドイツ、フランス、英国における加速器関連製造業の出荷額の推移

提供機関	調査名または資料名	国	産業分類	コード	TITLE	TITLE (日本語)	単位	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年
European Commission > Eurostat	Short-term business statistics	ドイツ	NACE Rev. 2	C266	Manufacture of irradiation, electromedical and electrotherapeutic equipment	照射、電気医療及び電気療法装置製造業	millions of Euros - Data adjusted by working days (2010年基準の生産指数より算出)	2,158	2,307	2,456	2,583	2,679	2,808	2,642	2,525	2,965	2,558	2,589	2,570	2,510	2,454
		フランス					745	866	922	975	817	849	895	970	1,015	936	1,339	1,281	1,307	1,318	
		英国					c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c	c
		EU15					-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

■ (参考) 国連統計による各国比較

提供機関	調査名または資料名	国	産業分類	コード	TITLE	TITLE (日本語)	単位	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年					
United Nations Industrial Development Organization	International Yearbook of Industrial Statistics	米国	ISIC Revision4	2660	Irradiation/electromedical equipment, etc.	照射、電気医療及び電気療法装置製造業	billions of Dollars									39.2								
		カナダ					millions of Canadian Dollars																	
		ドイツ					millions of Euros														3130	2906	2589	2589
		フランス					millions of Euros														1303	1200	1339	1730
		英国					millions of British Pounds														178	726	1056	990
		日本					billions of Yen														1694	1172	1488	

2) 加速器を利用する産業の分布

現時点における加速器を利用する産業の製造業や医療、農業といった分野別分布に加え、各分野の加速器利用による生産額を整理する。

(1) 加速器を利用する産業の定義・範囲の想定

加速器を利用する産業（以下、「ユーザー産業」と呼ぶ）を、加速器から直接放出される放射線の利用の視点から、以下のように定義する。

図表 I-13 加速器を利用する産業（ユーザー産業）の定義

<p>加速器を利用する産業（ユーザー産業）は、「加速器から生成される 1 次ビーム（イオン、電子線等）、及び 2 次ビーム（光子、中性子、陽電子、ミュオン、不安定核等）を利用・応用する産業（ビジネス）」のことである。</p> <p>※加速器から直接放出される放射線は 1 次ビーム、1 次ビームが生成する放射線は 2 次ビームと呼ばれる。</p>

次に、加速器から放出される放射線の利用分野の動向をみると、最近、利用可能な放射線（ビーム）の種類が急激に増加しており、利用分野も拡大している。放射線（ビーム）の利用分野としては、以下が挙げられる。

図表 I-14 加速器から放出される放射線（ビーム）の利用分野

ビームの種類	利用分野
1 次ビーム (イオン、電子)	<ul style="list-style-type: none"> ○照射加工(放射線加工、放射線処理、微細加工、食品照射……) ○材料改質(材料改質、新素材開発) ○非破壊検査 ○放射線滅菌 <p style="text-align: right;">等</p>
2 次ビーム (光子、中性子、陽電子、ミュオン等)	<ul style="list-style-type: none"> ○放射光⇒ 構造解析(物質材料、生命科学) 等 ○制動放射 X 線⇒ 除染・滅菌、放射線画像検査 等 ○イオン注入⇒ 集積回路等半導体デバイス製造 等

このように、ビーム（放射線）は、科学・技術・学術分野以外に、様々な産業分野において幅広く利用されており、国民の生活・福祉水準の向上等に大きく貢献している。

その中で、ビーム利用の大きい産業分野と利用形態を整理すると次図表のとおりとなる。ビーム利用の主要分野は、工業利用、医学・医療利用、農業利用であり、これらをユーザー産業（ビジネス）の範囲とする。

図表 I - 15 ビームの産業利用分野（例示）

		工業利用	医学・医療利用	農業利用
診る・観る	照射	化学反応の研究 製造材料の応力・組織パターンの観察 タンパク質の結晶構造解析 分子イメージング 細胞組織での分子動力学の研究 半導体素子のリソグラフィ 放射線画像検査（税関検査、コンテナ検査） 不純物モニタリング 環境モニタリング	画像診断 （PET、CT、X線、マンモグラフィ等）	
作る・造る・創る	注入	<イオン注入> 集積回路等の半導体デバイス製造 3次元デバイス製造 ガリウム系化合物半導体 金属、セラミック、高分子材料等の表面改質 触媒作用発現への応用 イオンミキシング	<イオン注入> 医用材料への応用 （医療用バイオ材料 等） がん治療のための放射性同位体製造	
	照射	高分子加工 （プラスチック、エラストマー、高分子の架橋形成等）		突然変異育種
	加工	精密溶接、切断、穿孔 ロウづけ、つや出し、表面硬化		
治す・無くす	照射	除染（廃棄物） 放射線滅菌	放射線がん治療 （X線、重粒子線、陽子線、中性子線）	殺菌・滅菌 （食品、食品包装資材、理化学機材、動物飼料等） 発芽防止（馬鈴薯） 不妊虫放飼法

（出所）各種公開資料をもとに野村総合研究所作成

（２）産業分野別の加速器利用の生産額

以上のような加速器利用の大きい各産業分野における加速器利用の生産額を、主に文献調査によって把握・整理する。

最も体系的に調査・整理されているのは、「放射線利用の経済規模に関する調査」（日本原子力研究開発機構、2007年度内閣府委託事業）である。この調査結果によれば、下図表に示されるとおり、平成17年度では全体で約4.1兆円（平成17年度）と試算されている。

図表 I - 16 ユーザー産業における放射線（ビーム）利用の経済規模（平成17年度）

分野	項目	経済規模 （億円）	構成比
工業利用	半導体加工	13,490	58.8%
	放射線設備	4,647	20.2%
	放射線滅菌	1,703	7.4%
	非破壊検査	1,100	4.8%
	計測機器	1,014	4.4%
	高分子加工	999	4.4%
	小計	22,953	100.0%
医学・医療利用	保健診療	15,061	98%
	自由診療	318	2%
	小計	15,379	100%
農業利用	突然変異育種	2,538	91.1%
	RI・放射能分析	146	5.2%
	照射利用	102	3.6%
	小計	2,785	100.0%
合計		41,117	100.0%

（出所）「放射線利用分野の経済規模調査」平成19年度

<日本原子力研究開発機構、2007年度内閣府委託事業>

3) 加速器等の開発に伴う技術の他産業へ与えた影響・波及効果の実態

過去の実例（CERN の大型陽子加速器 LHC 計画等）を参考に、大型加速器制作時の技術が加速器とは別の製造品に与えた影響（従来の技術では製造不可能など）などについて調査・分析を行う。

(1) CERN の LHC 等の技術的インパクトの調査

CERN がこれまでに公表している次の調査結果等をもとに、LHC 等の技術的インパクトを整理する。

- 「大型研究施設の経済・社会波及効果：CERN ケーススタディ」
“The Impacts of Large Research Infrastructures on Economic Innovation and on Society: Case Studies at CERN” OECD,2014
- 「LHC（大型ハドロン衝突型加速器）プロジェクトのハイテク産業へのインパクト調査」 2011
“The impact of CERN on high tech industry developments” CERN,2011
- 「科学とイノベーションを加速する：欧州の素粒子物理学研究の社会的恩恵」
“Accelerating science and innovation Societal benefits of European research in particle physics” Produced by the European Particle Physics, Communication Network for the CERN, Council, May 2013
- 「素粒子物理学、イノベーションへの重要なドライバー」
“Particle physics, a key driver for innovation: Facing Europe’s socio-economic challenges”CERN, 2011
- 「CERN：産業と社会への技術移転」
“CERN technology transfers to industry and society” CERN, 2005

①「大型研究施設の経済・社会波及効果：CERN ケーススタディ」から得られる知見

OECD は、2014 年 7 月に CERN をケーススタディの対象とした、国際研究所の経済的・社会的波及効果の潜在力について調査した結果を公表した。主な結果の概要は、以下のとおりである。

ア) CERN の波及効果のカテゴリー

以下の 5 つのカテゴリーが挙げられている。

- カテゴリー I：高度な基礎知識の獲得に向けた純粋な科学成果
- カテゴリー II：研究所の建設・運営にともなう直接的、間接的インパクト
- カテゴリー III：科学者、技術者、技術補助員、管理者及び他の専門家の人材育成
- カテゴリー IV：国家的、地域的、国際的な目標の達成；国際科学協力の強化
- カテゴリー V：科学的使命を追求しながら、開発し拡散させる技術革新

イ) CERN の波及効果のケーススタディ

CERN の代表的な波及効果として、「LHC メインリング二極磁石」、「ハドロンによる癌治療」、「ソフトウェアパッケージ」、「教育とアウトリーチ」の 4 つが挙げられている。このうち、「LHC メインリング二極磁石」のケーススタディ結果の要約を以下に示す

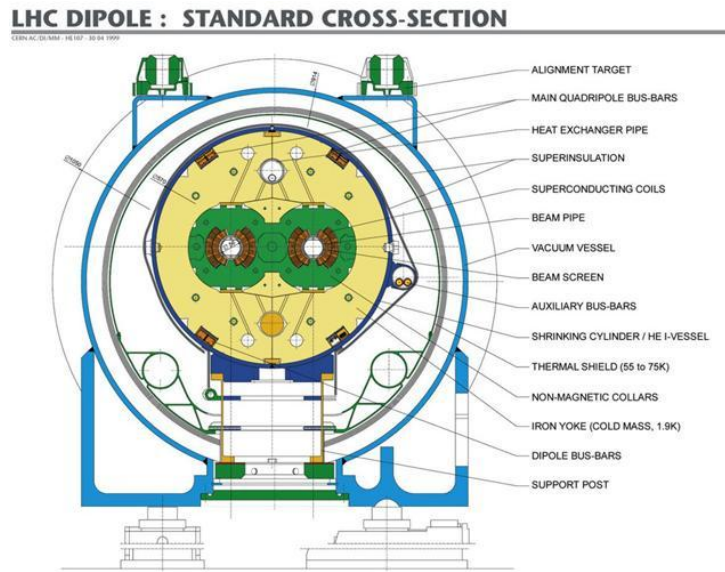
A. LHC メインリング二極磁石

- リング二極磁石の設計及び研究開発の過程は、主に CERN で実施された。CERN は、重要なスケジューリング、購入、製造、組立て、テストに対する直接的な責任、意思決定権および管理の権限を持っていた。
- この戦略を採用することで、CERN は、様々な企業に対するサプライヤー兼顧客の両方となった。研究開発段階で、CERN のエンジニアと管理者は、すべての設計仕様書を書き上げ、原料を購入し、選ばれたメーカーにそれらを引き渡し、原料や素材を提供し、製作されたコンポーネントを受け取った。
(例) ニオブチタン製ケーブルの仕様書が完成すると、CERN は、必要な原料の注文を出し、調達した原料をケーブル製造業会社へ引き渡し、次に、「コイル巻き」と「コールドマス」を組立てる契約者（3 社）に完成したケーブルを供給した。
- コイル巻きと二極磁石コールドマスの組立てに関する調達契約は、最大の LHC の契約であり、理事会を含む CERN 統治構造内で厳しく吟味された。確実に契約に入札するために必要な専門知識を持ったヨーロッパの会社の数は、必然的にきわめて少なかった。
- CERN は、最初にリングの 8 分の 1(160 のコールドマス)に対する入札のコールを出し、目標価格を明記した。しかし、応札はなく再度入札方法を検討しなければ

ならなかった。最終的には、同一の固定価格契約が3社と交渉された。すなわち、アンサルド・スーパーコンダクトリ（イタリア）、アルストム・ジューモン（フランス）およびバブコック・ノエル（ドイツ）である。いずれも先端技術企業の3社は、開発した技術と行動規範を共有するように要求された。

- 契約対象であるコイル巻線機は、3社により別々に開発された。カラー・プレスの場合、アンサルドは、INFN が購入した装置を使用し、アルストムのものは、CERN が別の会社から購入した一方、バブコック・ノエルは、自身のプレスを設計し建造した。溶接プレスはCERN で建造され、3社の組立て業者すべてに送られた。
- しかしながら、製作手順のほとんど全てがCERN によって正確に事前に定義されていたので、製造と組立て中に革新の余地はほとんどなかった。したがって、受注生産量が多くても、利益を押し上げる見込みは少なかった。にもかかわらず、契約3社の参加動機は、短期間の金銭的対価ではなく、CERN のための仕事を、高い商業的潜在力のある分野の技術（低温超伝導）を学ぶ機会とみなした。
- 当時、低温超伝導性は、決して新しい現象ではない一方、主として輸送とエネルギー部門の、きわめて多様な（かつ魅力的な）商業的応用の潜在的な源と認識されていた。例えば、大容量エネルギー貯蔵、長距離送電線、高電流スイッチ装置、変圧器、原子力発電所用発電機、トカマク核融合反応炉、これらのすべては、潜在市場および利益源と見なされていた。
- 契約3社は、これを見通していたと推測される。ただし、液体窒素温度で電気抵抗を失う高温超伝導体の出現（1980年代後半）によって、ややその見通しは修正せざるを得なかったが、その後商業ベースにのった医療分野での低温技術の応用、すなわち、ハドロン治療用サイクロトロンと核磁気共鳴映像法(MRI)スキャナーが出現した。3社のLHC 磁石契約者のうちの少なくとも1社は、これらの分野で活動的である。
- 契約3社の長期的な影響に関しては、それぞれ異なっている。1社は、他の市場へ会社の方向を転換し現在では全く超伝導に関与していない。もう1社は、超伝導等の先端技術研究を支援するビジネスを展開している。
- 超伝導等の先端技術研究支援の対象は、多様な種類の超伝導電磁石とともに、実験と設備用の先端技術を含んでいる。いくつかの領域（特に、核融合と宇宙・素粒子物理学）に、潜在的ニーズを持つ研究インフラストラクチャーがある。すでに、粒子加速器の衝突強度の更新(高性能の超伝導電磁石の開発を含む)、またはエネルギー更新(二極磁石はすべて交換する必要がある)が計画中である。しかしながら、これらの契約は、民間市場ではなく公的資金の提供がベースになり、大きな民間市場の機会(純粋な基礎研究以外)の可能性は低いと認識されている。

図表 I-17 LHC における二極磁石



② 「LHC プロジェクトのハイテク産業へのインパクト調査」から得られる知見

CERN では、「LHC (大型ハドロン衝突型加速器) プロジェクトのハイテク産業へのインパクト調査」(“The impact of CERN on high tech industry developments Focus: The construction of the LHC”) を実施し、2011 年に結果を公表している。主な成果の概略を取りまとめると、以下のとおりである。

ア) CERN と契約したハイテク企業における経済的利益

1973 年～1987 年の期間 (SPS 建設期間) に CERN へハイテク機器を納入した 519 企業のうち、160 企業への経済的利益に関するインタビュー調査の結果、以下が明らかになった。

【調査の前提】

CERN との調達契約 (製品納入) の結果としてもたらされた、企業の「売上増加額」及び「生産コスト削減額」を、「CERN の 2 次的経済インパクト (the “secondary” economic impact of CERN) 」の視点から調査した。

- 1 次的経済インパクト (長期的研究による直接インパクト : Direct impact of long-term research) は、定量化できない。
- 2 次的経済インパクト (研究の実行に必要で産業により供給される科学機器のインパクト) は、定量化できる。しかし、全ての 2 次経済効果を把握することはほとんど不可能であり、主要な効果に絞って調査した。
- ここでいう 2 次的経済効果は、具体的には、CERN との調達契約の結果発生した「新製品開発販売、品質改善、生産性の向上」による「売上増加+コスト削減」の金額である。
- なお、CERN の運営費 (物件費、人件費) の支出による直接経済効果は、調査の対象外とした。

【調査の主な結果】

- CERN の 2 次的経済効果は、企業が次の条件を満たす (全て又は少なくとも 1 つ) 場合に生まれているようである。
 - ・先端技術に積極的である
 - ・CERN 及び企業の上級スタッフ同士で良好かつ専門的な関係が構築されている
 - ・マーケティングの責任者が、CERN は潜在的顧客の参考になることを認識している。
 - ・企業の品質管理の責任者が、企業内で十分な影響力をもっている
 - ・企業が、必ずしも利益が得られない場合でも CERN の要求を満たす努力をしている
- CERN の 2 次的経済効果 (売上増加+コスト削減) によって、CERN 発注額 1 ユーロに対して、3 ユーロ分の付加的ビジネスが発生した。
- 増加した売上高の 75% は、素粒子物理学以外の太陽エネルギー、電気産業、鉄道、コンピュータ&情報通信分野の産業であった。

イ) LHC の調達活動による技術移転と技術的学習

■CERN の LHC サプライヤー産業の技術的成果

LHC の建設に関連して、1997 年から 2001 年の間に、CERN とサプライヤー契約を結んだ世界の企業は 6,806 社に達する。6,806 社のうち、一定規模額以上の契約を結んだ「技術集約的企業」は 629 社である。この 629 社にアンケート調査を実施し、回答企業数は 154 社（アンケート回収数 178）

以上のアンケート調査の結果明らかになった、CERN の LHC プロジェクトのサプライヤー側の成果として以下が報告されている。

サプライヤー産業全体に対して（アンケート回答上は 154 社）

- ①38%が、CERN プロジェクトからの直接成果として新製品を開発した。
- ②13%が、CERN プロジェクトのために新しい研究開発チームを設置した。
- ③14%が、新事業ユニットを立ち上げた。
- ④17%が、新市場を開拓した。
- ⑤42%が、国際的な露出を増加させた。
- ⑥44%が、技術的学習をした。
- ⑦36%が、市場の学習をした。

■サプライヤー産業への技術移転 (TT:Technology Transfer)

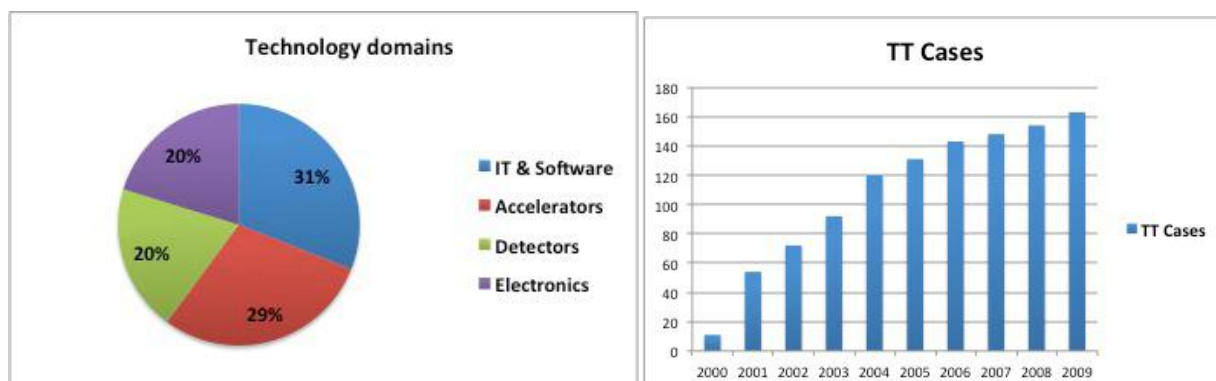
2000 年から 2009 年の間に、CERN から企業への技術移転のケースとして 163 事例があった。そのうち、90%以上は LHC プログラムと関係があった。

技術移転の分野は、「IT & ソフトウェア」31%、「加速器」29%、「検出器」20%、「エレクトロニクス」20%である。

具体例としては、IT 分野では、LHC 建設と実験のデータをハンドリングする EDMS (Electronic Document Management System)、加速器分野では LHC の超伝導磁石を組立てるための隔壁システム (diaphragm system) などがある。

LHC の建設が本格化した 2000 年から 2004 年の間において、技術移転 (TT) の件数は年間 22 件と急増。その後は漸増した。

図表 I - 18 CERN から企業への技術移転の分野及び件数の推移 (2000~2009 年)



ウ) CERN (LHC プロジェクト) のサプライヤー産業への効果波及の知見

- 大規模な物理研究プログラム (LHC) は、イノベーションを加速する。
- LHC プログラムは、多様性に富んだ技術・ノウハウを育成してきた。
- CERN の技術・ノウハウの大部分は特許要件を備えていないことが功を奏した。
- 素粒子物理の技術を共通にプールすることが産業への技術普及を促進する
- CERN の技術は幅広い分野に活用可能であるが即産業化の段階にあるものは少ない。
- CERN の技術は、産業化に向けてさらなる応用研究開発が必要である。
- 一般的な素粒子物理の技術が商用化されるまでの期間は 10 年～20 年である。

<参考> LHC の調達概要

CERN の LHC プロジェクトに係る調達の概要

①調達額：4,332 百万スイスフラン (CHF)

②契約数：1,040

③発注数：115,700

④サプライヤー数 (供給者数)：6,364

⑤調達分野

- 超伝導磁石・コンポーネンツ 50%
- 土木エンジニアリング 16%
- クライオジェニック機器 15%
- 技術サービス、インフラ 11%
- 加速器コンポーネンツ 6%
- 伝送ライン、ビーム源・ダンプ 2%

⑥調達の戦略

- CERN は、ゼネコンとして、加速器及び主要コンポーネンツ(検出器用のハードウェアの一部含む)の概念設計を行い、民間サブコンへ発注する。
- CERN の要求は2つのカテゴリーから成る。

A：標準的製品

B：新製品 (新しい概念設計及び生産方法の開発を必要とする製品)

(出所) “The Large Hadron Collider: A Marvel of Technology” Lyndon R. Evans 編集

③「素粒子物理学、イノベーションへの重要なドライバー」から得られる知見

CERN の公表した「素粒子物理学、イノベーションへの重要なドライバー」(“Particle physics, a key driver for innovation: Facing Europe’s socio-economic challenges”CERN, 2011) の中で、次のような効果が報告されている。

「CERN の直接経済効果として、産業の売上+コスト削減による経済効果は、CERN 発注額 1 ユーロに対して、3 ユーロ分の付加的ビジネスを発生させた。」

図表 I - 19 CERN の直接経済効果 (原文)

CERN’s direct economic impact Studies quantifying the direct economic impact of CERN, in terms of increased turnover plus cost savings resulting from contracts awarded by the Organization, show that every €1 paid to industrial firms generates €3 of additional business.
--

(出所) “Particle physics, a key driver for innovation Facing Europe’s socio-economic challenges”CERN,2011

④「科学とイノベーションを加速する：欧州の素粒子物理学研究の社会的恩恵」から得られる知見

CERN 委員会は、2013 年に「科学とイノベーションを加速する：欧州の素粒子物理学研究の社会的恩恵」(“Accelerating science and innovation Societal benefits of European research in particle physics” Produced by the European Particle Physics, Communication Network for the CERN, Council, May 2013) を公表した。

本レポートでは、CERN の主要な技術的成果がどのように産業や社会に応用されたかを取りまとめている。主な内容は、以下のとおりである。

【総論】

CERN は単なる研究所をはるかに超えた、イノベーションの発信基地となった。そこから、我々の現代社会を支える様々な技術開発が産み出された。例えば、ガン治療、医療・産業イメージング技術、放射線処理、エレクトロニクス、各種測定装置、新しい製造工程や新素材、情報技術、そしてワールド・ワイド・ウェブ (WWW) などの技術である。

これらの技術は、国内・国際経済に刺激を与えている。例えば、以下である。

○核医学画像市場の規模は、年間 100 億ユーロと見積もられており、毎年 10%の割合で成長している。

○CERN の LEP 実験の際に発明された「ワールド・ワイド・ウェブ (WWW)」は、1.5 兆ユーロの商業取引を誘発したと試算されている。

- CERN の LHC 実験の際に開発・活用された「ワールド・ワイド・LHC コンピューティング・グリッド (Worldwide LHC Computing Grid)」により発展した、クラウドとグリッド・コンピューティングの経済価値は 2010 年現在で、350 億ユーロと見積もられており、2015 年には 1,200 億ユーロに達すると考えられている。
- 欧州の TIARA サーベイによると、CERN と世界の 200 の研究所の基礎科学への年間投資額はおよそ 10 億ユーロ。それに比較し、莫大なリターンである。

CERN および欧州の研究所が行った素粒子物理研究に起因する経済的、社会的利益の多くは、1920 年代から 30 年代にかけて建設された加速器の応用から派生している。

加速器は、60 年前から産業的な富を産み出し、社会へと還元され始めた。世界の 2 万台の加速器 (世界で 1 万台の医療用加速器は含まず) は、今や、年 4000 億ユーロに値する商品・サービス (滅菌、検査等) をつくり出している。

また、医療用を含めた、世界の工業用・医療用加速器が産み出す市場規模は年間 5,000 億ユーロに達する。

加速器の用途としては、例えば以下があげられる。

- 製薬分野ではタンパク質の構造を解析する
- 新素材開発分野では、原子構造を調査して新素材の設計に使われる
- 医療スキャンに使うアイソトープをつくり出す
- 深部にある腫瘍を照射する
- 高速トランジスターにイオンを埋めこむ
- 炭素合材を鋼材の代替品となりうる強度へと硬化させる
- 貴重な美術品を精査する
- 考古学の重要な発掘品を調査する
- 有毒ガスを浄化する
- 核廃棄物を処理する
- 食品のパッケージを殺菌する
- 採油業者は油田を発見する
- タイヤメーカーはより良いラジアルタイヤを製造する
- 空港の保安要員は不審な荷物を特定することができる
- 金属表面を硬化させることにより車のベアリング、股関節・膝などの人工関節を改良する

図表 I - 20 CERN の主な技術開発と応用分野の例

	CERN での技術開発	CERN の技術開発の応用分野
医療とライフサイエンス	●「クリスタル・クリア共同研究(CCC)」では、CERN の測定器 CMS で使われているシンチレーション技術を小型化する方法を開発	■ネズミの脳内活動探査用 PET 装置の開発 ■乳がん診断用 PET ClearPEM プロジェクトでは、より正確な乳がんの発見に同じシンチレータ結晶を使用
	●素粒子測定器のために開発されたカロリメータ技術 (1秒間に6億回もの衝突エネルギーを記録するために開発された超大型測定器の技術)	■がん治療精密測定器の開発 小さなスキャナーを体内に入れ、光子1個分のエネルギーを3次元的に検出し、発現期のがんのバイオマーカーを超精密に画像化
	●「Endo-TOFPET-US プロジェクト」(内視鏡、陽電子放射断層撮影、超音波、時間飛行分析技術の略称)により開発された技術	■内視鏡的 TOF 型 PET 及び超音波診断装置 全身 PET より 100 倍高い精度で診断可能な技術
	●LHC 実験で開発された精密測定技術 (トップクォーク検出システム)	■ニューロチップによる網膜のメカニズム研究 ニューロチップという極小の装置を使った神経節細胞の実験観察
	●LHC 実験で開発された精密測定技術	■Medipix (測定装置) カラー・コンピュータ断層撮影技術を活用して、物体の内部の 3D 構造を画像化する装置 ■MARS (Medipix all resolution system) CT スキャン Medipix の改良技術を使ったスキャナー。患者に投与された 2 種類以上の造影剤を一度に識別可能
	●CERN の ISOLDE (Iseult) 測定器の技術	■ニューロスピン 仏原子力庁が脳科学研究に活用。高精密な MRI 画像の取得可能
	●CERN の設計による重粒子線治療に最適化された加速器 PIMMS (CERN に MedAustron の試験施設あり)	■重粒子線がん治療装置への転用 オーストラリアの MedAustron、イタリアの TERA の治療センターで使用
●CERN の反陽子ビームの癌治療等医療分野への応用を目指す ACE 実験	■難治性のガン治療法開発 (途上) ガン細胞の中の物質に反物質を照射して	

		対消滅を起こさせる方法
環境とエネルギー	<p>●LEP、LHC の真空技術 (真空度を高めるためにビームパイプの中に敷き詰められる金属のリボン<分子のハエ取り紙>技術=断熱技術)</p>	<p>■太陽光パネル (太陽光集光装置) への導入 真空を作る断熱技術は、50%のエネルギー転換効率を達成可能。これは、従来の屋根設置型ソーラーパネルの10倍の効率。ジュネーブ空港に設置済み</p>
	<p>●加速器用の超伝導磁石を運転するための超伝導ケーブル技術 (絶対温度 25°Cで、絶対温度数°Cと同じ電圧の送電が可能な二ホウ化マグネシウム製の超伝導ケーブルを CERN が開発中)</p>	<p>■超伝導ケーブルの他分野での活用</p>
	<p>●CERN の TARC 実験 (1990 年代) で行なわれた、加速器を使った発電、核廃棄物管理、医療用同位体製造の準備的な研究</p>	<p>■中性子飛行時間法実験施設(n-TOF)で継続 ⇒包括的なプロジェクト: グィネヴィア・ミルラ実験 (Guinevere-Myrrha) において試験実施</p>
通信と新技術	<p>●測定器の大量情報を伝達するためにワールド・ワイド・ウェブ (WWW) を開発</p>	<p>■WWW の世界的普及 WWW の経済価値は年間 1.5 兆ユーロと試算されている</p>
	<p>●LHC の膨大な実験データ (年間 15 ペタバイト) に対応するために数千のコンピュータとストレージシステムをつなぐ「ワールド・ワイド LHC コンピュータ・グリッド」を開発</p>	<p>■EGI-InSPIRE⁵に引継がれインフラ化 欧州内の高性能計算機センターや情報処理資源のグリッド間の電子転送のためのインフラを構築・維持する取組み</p>
	<p>●CERN はガス電子増倍管 (GEM) を開発</p>	<p>■医療イメージング、宇宙物理学、構造解析等多くの分野で応用 <例>森林火災の出火検知装置 (既存の紫外線センサーの 100 倍の感度を持つ)</p>

(出所) “Accelerating science and innovation Societal benefits of European research in particle physics” 「科学とイノベーションを加速する: 欧州の素粒子物理学研究の社会的恩恵」をもとに野村総研作成

⁵ EGI-InSPIRE : European Grid Initiative (EGI) – Integrated Sustainable Pan-European Infrastructure for Researchers in Europe

⑤ 「CERN : 産業と社会への技術移転」から得られる知見

CERN が 2005 年に公表した「CERN : 産業と社会への技術移転」(“CERN technology transfers to industry and society”)には、CERN が 1997 年～2001 年に企業へ技術移転した 58 の代表例が掲載されている。

LHC の加速器及び検出器関連を中心に、機器・システムの技術移転が行なわれた。

図表 I - 21 CERN の企業への技術移転例 (1997 年～2001 年)

	技術・製品	実験分野	企業名	
1	Aluminium Tubes	アルミニウムチューブ	ALICE, LHCb	OUTOKUMPU HOLTON Ltd.
2	Superconducting Magnets and Coils	超伝導磁石・コイル	ALICE, LHCb	SIGMAPHI
3	Detector Electronics	検出器電子部品	ATLAS	INTERON AS
4	High-Voltage Multi-Channel System	高電圧マルチチャネルシステム	ATLAS	ISEG Spezialelektronik GmbH
5	Multiple Helium Transfer Lines	マルチパイプヘリウム輸送ライン	ATLAS,CMS	DEMACO Holland bv
6	Optical Fibres	光ファイバー	ATLAS,CMS	ERICSSON Network Technologies AB
7	Tracking Software	追跡ソフト	CMS	AGILIUM S.A.
8	Multi-Fibre System	マルチファイバースystem	CMS	DIAMOND S.A.
9	Power Supply Cables	電力供給ケーブル	CMS	HABIA KABEL GmbH
10	Electronics	電子機器	COMPASS	ACAM-messelectronic GmbH
11	Multi-Channel Chip	マルチチャネルチップ	DELPHI	IDEAS ASA
12	Rolled Rings	ロール型リング	LEP	IMBACH & CIE AG
13	Dipole Magnet & Superconducting Cavities	二極磁石、超伝導加速空洞	LHC	ANSALDO Superconduttori S.p.A.
14	Corrector Magnets	修正用磁石	LHC	ANTEC S.A. Aplicación Nuevas Tecnologías
15	Informatics Supervisory Solutions	情報処理	LHC	ARC Informatique
16	Non-Magnetic Stainless Steel	非磁性鋼	LHC	BÖHLER Edelstahl GmbH
17	Diode Laser Welding	ダイオードレーザー溶接	LHC	BUTTING
18	Cable for Monitoring	モニタリング用ケーブル	LHC	DRAKA Multimedia Cable GmbH
19	DC Current Measuring System	直流電流計測システム	LHC	HITEC Power Protection bv
20	Quality Inspection of Equipment and	品質検査機器	LHC	ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade
21	Dipole Magnet	二極磁石	LHC	LINCOLN ELECTRIC Italia S.r.L.
22	Helium Refrigerator Plants	ヘリウム冷凍プラント	LHC	LINDE Kryotechnik AG
23	Gas-Cooled Resistive Current Leads		LHC	MARK & WEDELL AS
24	Current Calibrator	標準電流発生器	LHC	METRON DESIGNS Ltd.
25	Advanced Powder Metallurgy End Covers		LHC	METSO Powdermet Oy
26	Superconducting Strands	超伝導ストランド	LHC	OUTOKUMPU Poricopper Oy
27	Leak Welds Device		LHC	PXL INDUSTRIES
28	Ultra-High Vacuum	超高真空	LHC	SAES Getters S.p.A.
29	Cryomagnet Interconnection		LHC	SKODOCK GmbH
30	Circular Connector	丸型コネクタ	LHC	SOURIAU S.A.S.
31	Magnets	磁石	LHC	TESLA Engineering Ltd.
32	Computer Network	コンピュータネットワーク	LHC	U4EA Technologies Ltd.
33	Cryogenic Valves	冷凍バルブ	LHC	VELAN S.A.S.
34	Pressure Vessels	圧力容器	LHC, ATLAS	A. SILVA MATOS METALOMECÁNICA, S.A.
35	Dipole Magnet and Remote Handling	二極磁石、遠隔操作	LHC,LEP	BABCOCK NOELL NUCLEAR GmbH
36	Magnetic Field Teslameter	磁気測定器	SPS	METROLAB Instruments S.A.
37	Hybrid Pixel Detector	ハイブリッドピクセル検出器	SPS	PANALYTICAL
38	All-Metal Gate Valves	全金属ゲートバルブ	SPS	VAT Vakuumventile AG
39	Instrumentation	機械運転器具	SPS,LEP	MIDI INGENIERIE

図表 I - 22 CERN の企業への技術移転例（1997 年～2001 年）〈つづき〉

	技術・製品	実験分野	企業名	
40	Printed Circuits	プリント配線	加速器	AS&T Service S.n.c.
41	Digital Imaging & Control Systems	デジタルイメージング & 制御システム	加速器	BIOSCAN
42	Measuring Rod	測深ロッド	加速器	GEODESIE INDUSTRIELLE S.A.
43	Control and Monitoring Systems	制御 & モニタリングシステム	加速器	GTD Ingeniería de Sistemas
44	Energy Autonomy		加速器	NEWTECH S.A.
45	Ion Pumps	イオンポンプ	加速器	VARIAN, Inc., Vacuum Technologies
46	Micro Strip Gas Chamber	マイクロストリップガスチェンバー	測定器	IMT Masken und Teilungen AG
47	New Scintillator and Earth Silicate Materials		測定器	PHOTONIC MATERIALS Ltd.
48	Halogen-Free Cables and Connectors	ハロゲンフリーケーブル・コネクタ		3M Inovation
49	Hydraulic Scissor Table	油圧シザーテーブル		ACL - Alfredo Cardoso & Cª Lda
50	Mechanical Systems	機械システム		ATOS
51	Electronic Devices and Luminous Fibers	電子機器		CAEN S.p.A.
52	Network Management Systems	ネットワークマネジメントシステム		EFACEC Sistemas de Electrónica, S.A.
53	Integrated Digital Conference	統合電子会議		FONTISMEDIA S.A.
54	Intelligent Assistant	インテリジェントアシスタント		INTELLART SA
55	Power Converters	電力変換装置		O.C.E.M. S.p.A.
56	High-Performance PET Scanner	高性能PETスキャナー		RAYTEST GmbH
57	Accelerator Components	加速器コンポーネンツ		SIMIC S.p.A.
58	Chemical Microvia	ケミカルマイクロビア		TECHTRA Ltd.

(出所)「CERN: 産業と社会への技術移転」“CERN technology transfers to industry and society”
に掲載されている事例を整理

(2) DESY-XFEL の技術的インパクトの調査

① DESY の TESLA プロジェクトにおける経済波及効果

DESY の TESLA 計画における経済波及効果について、Wilhelm Pfähler 教授 (ハンブルク大学)らにより 2003 年 4 月に報告書 “Wirtschaftsfaktor TESLA-Projekt” がまとめられた。

TESLA 計画とは、DESY 近郊に立地した、超伝導加速技術をもちいるリニアコライダー(LC)および XFEL 計画として、ドイツの研究者コミュニティがドイツ政府に提案したが、XFEL 計画のみが 2003 年に承認され、今日の European XFEL 計画となった。TESLA-LC 計画はその後、米国や日本の各地域に平行して進められていた LC 計画と一本化する形で、国際リニアコライダー(ILC)計画となった。

Pfähler 教授の報告書は、TESLA-LC および TESLA-XFEL 計画のそれぞれにおいて、需要効果を算出している。この需要効果の計算においては、直接的効果、間接的効果、プロジェクト特有効果、産業効果、外部効果、および総合効果の各項目に分けて評価されている。これらの評価は、ハンブルク市、ドイツ北部地域⁶、ドイツ全国の各地域において算出されている。

同報告書では需要効果の絶対値と相対値が算出されているが、絶対値はプロジェクト規模に依るため、ここでは相対値として算出された、所得乗数と雇用乗数のみ抜粋してまとめる。

図表 I - 23 TESLA-LC 計画における経済波及効果

所得乗数(ハンブルク市):	1.2
所得乗数(ドイツ北部):	1.6
所得乗数(ドイツ全国):	1.8
雇用乗数(ハンブルク市):	1.3
雇用乗数(ドイツ北部):	1.5
雇用乗数(ドイツ全国):	1.9

(出所) “Wirtschaftsfaktor TESLA-Projekt” の「Tabelle 17: Regionale Multiplikatoren」より作成

⁶ ドイツ北部は、ハンブルク特別市、ニーダーザクセン州、シュレーズヴィヒ=ホルシュタイン州、ブレーメン州、メクレンブルク=フォアポンメルン州、ベルリン特別市、ブランデンブルク州を合わせた地域である。

図表 I - 24 TESLA-XFEL 計画における経済波及効果

所得乗数(ハンブルク市):	1.2
所得乗数(ドイツ北部):	1.6
所得乗数(ドイツ全国):	1.8
雇用乗数(ハンブルク市):	1.3
雇用乗数(ドイツ北部):	1.5
雇用乗数(ドイツ全国):	1.9

(出所)“Wirtschaftsfaktor TESLA-Projekt”の「Tabelle 31: Regionale Multiplikatoren」より作成

②EXFEL プロジェクトの経済効果

ハンブルグ大学の「配分と競争研究所」(the Institute for Allocation and Competition)の行なったヨーロッパ XFEL (EXFEL) の建設による経済効果に関する一連の調査研究によれば、以下の点が明らかになっている。

要約すると、ヨーロッパ XFEL プロジェクトは、すでに立ち上がり段階から、参画する企業に対して主要なイノベーション (革新) だけでなく、より多くの雇用、収入、所得を提供している。

ア)「供給効果」(イノベーション等) に関して

一つの調査研究では、いわゆる「供給効果」(supply effects) が検証された。ここで言う供給効果とは、DESY の X 線レーザープロジェクトにおいて開発された新しいテクノロジー及び手続 (procedures) が、長期的に経済発展を推進する効果などである。

この調査研究は、DESY の主に X 線レーザーや自由電子レーザー技術を開発しテストするための施設である TTF (TESLA Test Facility) に機器を供給した 57 企業へのアンケート調査に基づいている。調査の主要な結果は以下のとおりである。

■DESY TTF の供給効果についての調査結果

【アンケート調査対象：57 企業 (供給事業者)】

- ①38% : X 線レーザーの建設に協力することによって、少なくとも 1 つの製品範囲において「重要な」または「非常に重要な」イノベーションがあったと回答
- ②53% : X 線レーザーのために開発された製品を他の目的の使うことができると回答
- ③60% : 企業の製品範囲への何らかの影響を認識していると回答
- ④23% : 企業の従業員に大きな学習効果があったと回答
- ⑤82% : DESY を重要顧客とみなしており、DESY との協働においてはイノベーションの創出が最も重要な役割を果たした (収入より重要と認識) と回答

TTFに関連する主な技術開発は、「高周波技術」、「エレクトロニクス」、「パワーエンジニアリング」、「パルスパワー技術」、「冷却技術」等の分野においてなされた。例えば、冷却技術分野では、自由電子レーザー用の超伝導加速器を摂氏マイナスの271度で動作させるために開発された合成素材は、放射線に高い抵抗力があり、また、他のアプリケーション分野に応用できる。

一方で、加速器用の構造を持った建物は、機械的製造工程、化学エンジニアリング、冶金、機械建設、および測定・制御技術の分野でのイノベーションを創出した。これらのイノベーションは、医療技術、化学分析、レーダーと衛星技術、通信エンジニアリング、および化学プラント建設等に適用可能である。

自由電子レーザーに関連した企業のうち67%は、新製品・新手法・新サービスをデザインし、そのうち79%は、新製品の新しい顧客開拓に既に成功、または将来開拓を予期していると回答した。

さらに、60%の企業は、X線レーザープロジェクトのための新技術開発が、他の製品の開発へ影響を与えたこと（特に、製品品質、及び開発・生産・サービスのコスト削減において）、または、プロジェクトの進展の途中でそれが起こることを予期していると回答した。

イ)「需要効果」(雇用、所得、収入等)に関して

別の調査研究においては、EXFELの建設段階における「需要効果(demand effects)」が検証された。ここで言う需要効果とは、創出または達成される雇用、所得および収入のことである。

この研究によると、EXFELの建設段階において、ドイツ全体で1,350を超える新しい雇用機会が発生し、そのうち約半分はハンブルク及びドイツ北部地方に発生するとされている。また、最も利益を得る産業セクターは、卸小売業、建築業、金融サービス業及び機械製造業である。さらに、所得は5,500万ユーロ以上、収入は約1億2,000万ユーロとなる。

これらの雇用、所得、収入のうち概ね50%が、DESYとその供給事業者による直接効果である。残りの半分は、いわゆる「誘発効果(induced effects)」である。これは、給与所得者が得た所得のうち、消費支出に回される分によって引き起こされる効果である。誘発効果の大きいセクターは、小売業、サービス業及び住宅である。

すでにEXFELの建設段階において、総費用(そのうち58%はドイツから出資)は、大きな成長とイノベーション効果に匹敵している。この経済的効果は、一部の地域だけではなくドイツ全国にとって有益である。

ウ) 既存研究では考慮されていない重要な効果に関して

これまでの調査研究において考慮されなかった、極めて重要なファクターがある。それは、最先端研究センターが、研究と技術に関してドイツ全体に及ぼすインパクトである。特に、EXFELの運用段階において、EXFELはより一層の技術革新及び研究と産業の新開地開拓の源泉になる。これらの要素は、既存の調査研究では対象とされてこなかったが、重要な効果である。

4) ILC の概要及び実現に必要な技術・機器の体系

(1) ILC 計画の概要

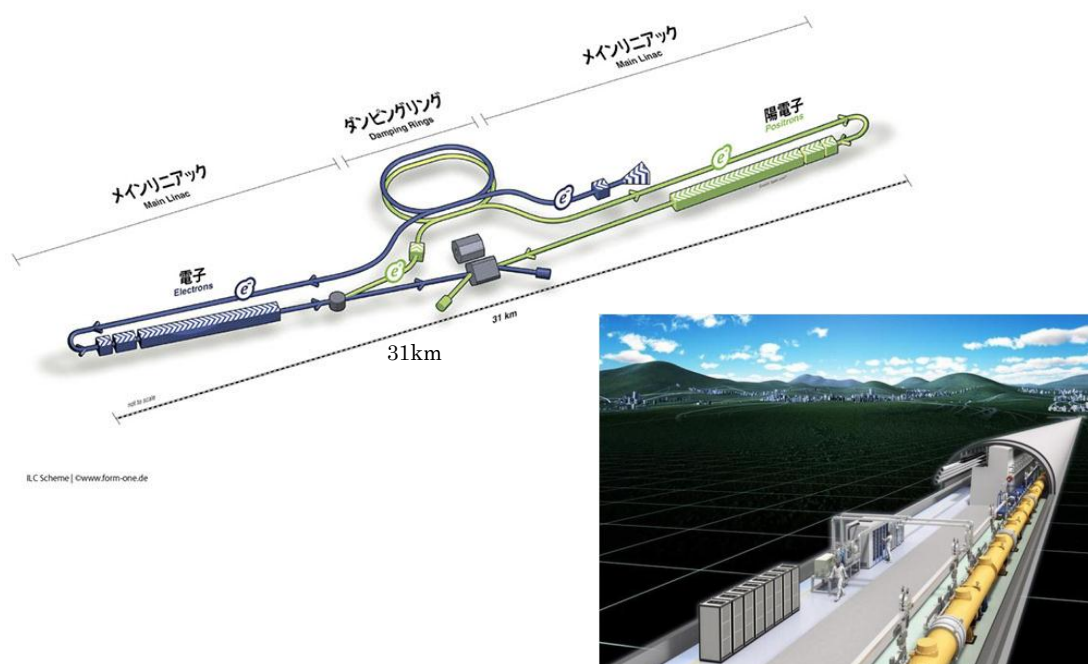
2004年夏、世界の高エネルギー物理学研究者・加速器研究者は、ICFA（将来加速器国際委員会）において、国際協力による「リニアコライダー（衝突型線形加速器）」を超伝導技術に基づいて建設することについて合意した。これは「ILC（International Linear Collider）計画」と呼ばれている。

ILC 計画は、現在欧州の CERN（欧州合同原子核共同機関）で稼動している LHC（Large Hadron Collider：大型ハドロン衝突型加速器）の次に実現すべき有力な大型基幹計画として位置づけられ、全長約 30km の（および将来の拡張性として 50km までを見込む）直線状の加速器をつくり、現在達成しうる最高のエネルギー領域（TeV：1兆電子ボルトまでの）で、電子と陽電子の衝突実験の実現を目指すものである。

ILC 計画の目的は、実験装置にビックバン直後の超高エネルギー状態を作り出すことによって、CERN で発見されたヒッグス粒子の精密研究、トップクォークの対生成に関する研究、超対称性粒子の探索等を通して、質量の起源、時間と空間の謎、さらには宇宙創成の謎を突きとめようとするものである。

ILC 計画を進めるために、アジア・欧州・米国などの 3 地域から素粒子物理・加速器科学研究者による国際共同研究チームが作られ、日本の研究者も世界中の研究者と密接に協力しながら研究を進めている。また、ILC の建設候補地の選考も進められつつあり、日本は有力な候補地の一つとなっている。

図表 I - 25 ILC のイメージ図



(出所) KEK（高エネルギー加速器研究機構）

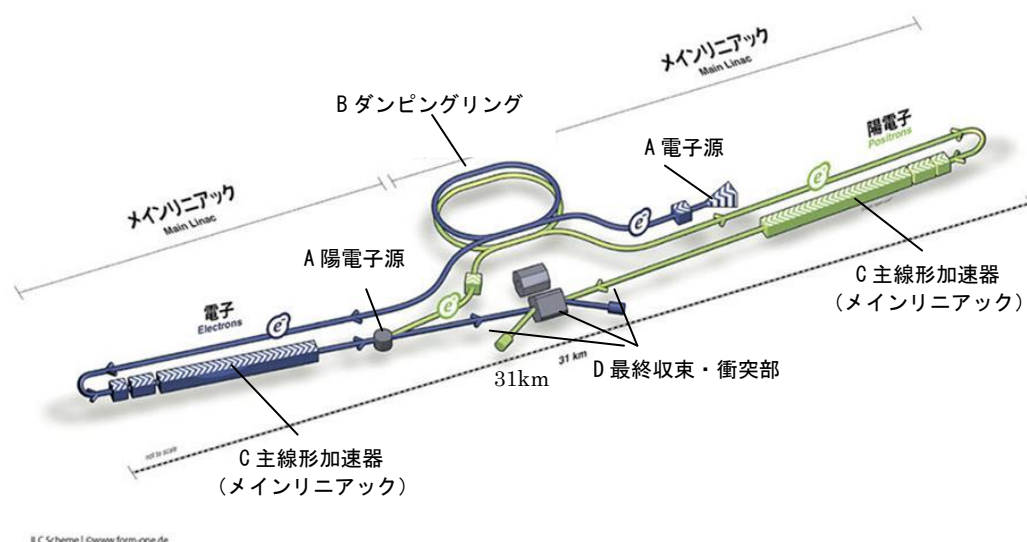
(2) ILC 技術の概要と特徴

① ILC 技術の全体像

巨大な電子・陽電子衝突実験装置である ILC は、大きく次の 4 つの部分から構成されている。

- A. 「電子・陽電子源」：電子と陽電子のビームをつくる部分
- B. 「ダンピングリング」：加速装置に質の高いビームを送り込むための部分
- C. 「主線形加速器（メインリニアック）」：電子と陽電子のビームを加速する直線加速装置の部分
- D. 「最終収束・衝突部」：電子と陽電子のビームを最終収束し衝突させる部分（ビームダンプ部分含む）

図表 I - 26 ILC の主要部分の構成



また、ILC の技術開発上の鍵技術（キーテクノロジー）は、次の 2 つとされている。

■超伝導高周波加速技術（SCRF : Superconducting Radio Frequency）

- ・超伝導高周波加速空洞を使って粒子ビーム（電子と陽電子）を加速する技術。ILC では長さ約 1m、直径約 20cm の 9 連加速空洞が使用される。500GeV での運用時には、加速空洞が ILC 全体で 16,000 台必要とされる。9 連加速空洞を 8～9 台まとめてワンセットとして、断熱した真空容器内に組み込む。これを「クライオモジュール（Cryomodule）」という。500GeV での運用時には、クライオモジュールが ILC 全体で 1,850 台必要とされる。
- ・2004 年に ILC には超伝導加速空洞の技術を採用することが決定された。以来、日本（KEK）、ドイツ（DESY）、米国（FNAL、SLAC）が中心となり超伝導加速空洞の技術開発を推進してきた。2014 年末現在で ILC に求められる性能（加速勾配 31.5MV/m）を 90% 以上の成功率で達成し、概ね実用化段階まで到達し

ている。

■ナノ・ビーム制御技術 (Nano-beam handling)

- ・粒子の衝突の精度を上げるために、粒子ビームをナノレベルの大きさに絞り込む技術。ILC では、高安定な超低エミッタンスビームの生成とその位置制御、電磁石でビームを極小サイズに絞り込む技術等の開発が必要とされている。
- ・ナノ・ビーム制御技術については、日本の KEK-ATF (先端加速器試験施設) が国際的にユニークな開発拠点である。
- ・ATF ではこれまでに超平行ビーム (低エミッタンスビーム) を達成。現在は ATF のエネルギーで求められるナノ・ビームサイズの目標 37nm (ILC のエネルギーでは 5.9 nm に相当) の達成に向けて研究開発中である (2014 年 6 月時点で 44nm 達成。ILC のエネルギーに換算すると 7nm)。

以下では、粒子 (電子・陽電子) の発生・加速・衝突の流れに沿って、ILC の構成部分ごとに、基本原理と技術開発上の特徴等の概要を示す。

なお、ILC 技術の概要記述にあたって、以下の文献を参照し一部引用している。

- 『宇宙を創る実験』村山斉編著、集英社新書、2014 年
- 『ビッグバンをつくりだせ』高橋徹、岩田正義、天満ふさこ著、プレアデス出版、2007 年
- 「大型超伝導加速器計画：International Linear Collider(ILC)－概要－」山本明、低温工学、47 巻 X 号、2012 年
- 「ILC TDR Overview ILC 技術設計書・概要」山本明、第 1 回 ILC 技術設計書検証作業部会 (文部科学省) 参考資料 2、2014 年 6 月 30 日
- 「ILC の準備状況」山本明、平成 26 年度第 2 回「加速器関連産業参入セミナー」いわて産業振興センター、2015 年 2 月 16 日

②電子・陽電子源（電子と陽電子のビームをつくる部分）

ア) 電子をつくる（偏極電子源）

ILC の実験には、まず電子が必要である。ILC では、スピン（回転）の方向のそろった電子を使う。スピンの方向のそろった電子を「偏極電子」という。

偏極電子を使う理由は、次のとおりである。

スピンの方向が電子の運動方向に向いている場合を「右巻き」、反対方向に向いている場合を「左巻き」という。スピンの方向は、素粒子物理（標準模型）の中で重要な役割を果たしている。例えば「弱い相互作用」は、左巻きの粒子のみに作用するなどである。

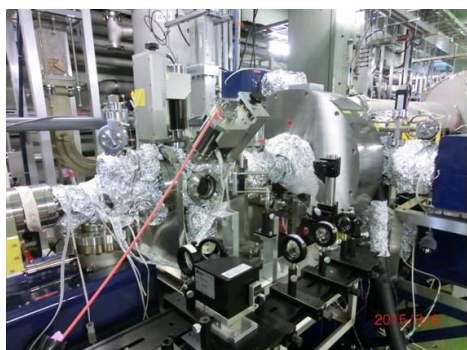
したがって、ILC では、スピンの方向（右巻き、左巻き）をどちらかに統一することによって、電子と陽電子の衝突による反応をより詳細かつ正確に調べることが可能になるため、偏極電子を使うことになっている。

偏極電子源から、偏極電子をつくり出す原理は、次のとおりである。ILC の偏極電子源の開発においては、日本のグループが世界トップレベルの実績をあげている。

■偏極電子源の原理

- ・金属に光を照射すると電子がはじきだされる。これは、光電効果と呼ばれる。
- ・偏極電子は、光電効果を利用し、ガリウムヒ素を成分とする金属に円偏光レーザーを照射してつくる。
- ・円偏光レーザーとは、「スピン方向のそろった光子の集まりであるレーザー光」のことである。円偏光レーザーは、比較的簡単につくることができる。
- ・レーザーをあてると、金属から多量の電子を発生させることができる。また、レーザーの偏光を制御する（右巻き、左巻きのいずれかに揃える）ことによって、照射対象となる電子のスピンの方向（右巻き、左巻き）を制御できる。
- ・以上が、円偏光レーザーを使って、偏極電子をつくり出す基本原理である。
- ・ただし、現在の技術では、100%同一スピン方向に制御することは難しい（95%以上とされている）。

電子ビーム生成部分の装置



(KEK-STF 加速器の一部)

イ) 陽電子をつくる (陽電子源)

ILC の実験には、電子と衝突させる陽電子が必要である。陽電子は、自然には存在しないため、電子のように物質から取り出すことはできない。ILC では、電子用の主加速器の途中にアンジュレータを入れて放射光 (光子) を作り出し、それを金属標的に当てる方法が考えられている。

アンジュレータは、電子の進行方向に沿って磁石を並べた装置である。その中で電子が通過すると、電子は磁力を受けて蛇行し、その際に放射光を発する。この放射光を金属標的に当てると「電磁シャワー」によって、電子と陽電子が大量に発生する。ILC ではそこから発生した陽電子を使う。

■電磁シャワーとは

- 光子のエネルギーが電子と陽電子の質量 (両者は等しい) を足したものを超えると、光子から電子と陽電子の「対 (ついで)」が生まれる。この現象は、「電子・陽電子対生成」呼ばれる。
- この電子と陽電子のエネルギーが十分に高いと金属中で再び光子を出し、その光子がまた電子・陽電子対をつくりだす。この過程が何度も起こることによって、電子や陽電子が金属中をシャワーのように飛び交う現象が発生する。これを電磁シャワーと呼ぶ。

金属標的に当てる光子を偏極できると、陽電子も偏極させることができる。陽電子を電子と同様に偏極できれば、偏極電子と偏極陽電子の衝突が実現し、その反応はより詳細かつ正確に捉えることが可能となる。

偏極陽電子生成は、偏極した光子を標的にあてて電磁シャワーでつくることができる。偏極した光を作り出す方法は、上記のアンジュレータをつかう方法以外にも「レーザーと電子を使う」方法等があるが、ILC では、アンジュレータ方式 (ヘリカルアンジュレータ) が採用される方針となっている。しかし、この方法は、主加速器からの電子を使うことから主加速器ができるまで陽電子生成部分を作ることができないため、陽電子ビームの強度や収集方法に不確定要素があることや、電子側でつくった陽電子を反対側に運ばなければならないなどの問題のあることが指摘されている。

③ダンピングリング（加速装置に質の高いビームを送り込むための部分）

ア) 質の高いビームの意味と必要性

ILC は線形加速器であるため、円形加速器のように衝突しなかった粒子を再利用することができない。したがって、それぞれ反対方向から加速されてくる粒子同士（電子と陽電子）を高い確率で衝突するようにしなければならない。そのためには、粒子ビームのサイズを小さく絞り込んで、粒子の密度を高めることが必要となる。

ILC で加速する粒子（電子と陽電子）は、バンチと呼ばれる粒子のかたまりを単位としている。バンチは、電子、陽電子ビーム各々、約 200 億個の電子、陽電子から構成される。ILC では、加速器の運転パルス当たり 1,000~2,600 個のバンチを、約 100m（時間間隔で約 300 ナノ秒）の間隔で並べて衝突点に送り込む。これは、バンチを並べて列車（トレイン）のようにするので、バンチトレインと呼ばれる。

このバンチトレインは1秒間で 5 回繰り返される。したがって、電子、陽電子各々につき、1秒間で 5,000~13,000 個のバンチが衝突点に送り込まれることになる。このようなバンチとバンチトレインの方式は、限られた電力で効率よく粒子を加速するための工夫の一つである。

ところで、バンチの中の 200 億個の粒子（電子・陽電子）が、バラバラな方向に動いてはバンチが広がってしまい、粒子ビームを絞ることができず、ぶつけにくいビームとなってしまう。電子と陽電子の衝突実験の成果を上げるためには、質の高いビームすなわち、「ぶつけやすいビーム」にすることが重要となる。

ぶつけやすいビームにする（粒子ビームを絞る）ためには、バンチを構成する粒子のエネルギーが揃った広がりにくいビームをつくることが必要となる。広がりにくいビームとは、「ビームの平行度が高く小さくまとまったビーム」のことであり、それを表す指標として「エミッタンス」（平行度とビームのまとまりを表す値）が使われる。エミッタンスが小さいほど、広がりにくいビームとなる。

このような低エミッタンスの「超平行ビーム」をつくるのが、ILC のダンピングリングである。

イ) ダンピングリングの原理

ダンピングリングによってビームの平行度を上げる原理は、次のとおりである。ダンピングリングは、低エネルギー（5GeV）の円形加速器である。円形加速器であるダンピングリングを通過して（電磁石によって）粒子が曲げられると放射光を放出しエネルギーを失う。この失ったエネルギーを、ダンピングリングの加速空洞の高周波で加速し補てんする。これによって、粒子ビームは軌道を外れることなくダンピングリングを回り続けることができるとともに、エネルギーの損失と補填を繰り返すことによって平行度が高まっていく。これを「放射減衰」という。

このように、ダンピングリングの主な機能は、エネルギー損失が小さい段階で、粒子ビーム（電子と陽電子）を「超平行ビーム」（低エミッタンスビーム）にすることである。

ウ) ダンピングリングに使われる磁石

ダンピングリングには、偏向磁石（ビームを曲げる電磁石）、四極磁石（ビームをフォーカスする電磁石）、六極磁石（ビームのエネルギー偏差から生じる収束偏差を抑制する電磁石）の3種類の電磁石が使われる。

④主線形加速器（電子と陽電子のビームを加速する直線加速装置の部分）

ア）大型加速器の基本原理（粒子を加速する仕組み）

粒子ビームを加速させるのは「電場」であり、電場によって粒子を加速する仕組みは次のとおりである。

荷電粒子は、2つの電極版でつくった電場に入ると、反対の電極版に引き寄せられる。たとえば、電子（マイナス）は、電場に入ると、正（プラス）の電極に向かって加速される。粒子が電極に引き寄せられる電場のことを「加速電場」という。

加速電場を数多くつなげれば、その距離が長いほど粒子が加速する。粒子の進行に合わせて、電極のプラスとマイナス向きを入れ替えながら、次々に電圧をかけていけば、通過する粒子をどんどん加速させることができる。したがって、加速器の重要な機能は、粒子が加速器中を動くのに合わせて、電極の正負を切り替えることである。

しかし、これを直流で積み重ねると電圧が高くなりすぎて、どこかで「放電」を起こす。放電を回避するためには交流にする必要がある。交流の場合、一定の電圧内で、周期的に極性を反転しつつ、電圧が変化するので、放電を回避できる。これが、大型加速器の基本原理である。

実際の大型加速器（常伝導、超伝導を問わず）では、粒子ビームの通る加速空洞の中に高周波の電磁波を入れて加速電場をつくる。この加速電場では、例えば電子の場合、進行のスピードに合わせてプラスとマイナスが切り替わることによって、プラスで引き寄せ、マイナスで押し出し、プラスで引き寄せの動作が繰り返えされ、電子は加速されていく。ただし、粒子は光速で進んでいるので、電圧の切り替えは非常に早く行なう必要がある。それを可能にするのが加速空洞に高周波を注入し加速電場をつくるという方式である。

イ）加速空洞を超伝導にする意味

ILC では、粒子ビームの加速のために超伝導技術を使うことに決まっている。超伝導の加速器（加速空洞）を使う理由は、次のとおりである。

加速空洞を液体ヘリウムで冷却して超伝導状態にすると、電気抵抗をほぼゼロに近いところまで下げられる。電気抵抗が高ければ、加速のために注入された高周波電力の一部は、熱エネルギーとして無駄に消費される割合が高くなり、電力の浪費になる。超伝導であれば、この熱として失われるエネルギーを最小限にし、エネルギー効率を上げることができる。その結果、ILC 全体の電力消費を節約できることになる。

ただし、超伝導加速空洞とはいえ、電気抵抗を完全にゼロにすることはできない。注入した高周波電力の一部は、空洞内で熱として消費される。超伝導空洞では、注入した高周波エネルギーの約 60% が粒子ビームのエネルギーに転換される。

この熱量は、加速空洞を 2K（絶対温度で 2 度）に保つための冷凍装置にとっては、大きな熱負荷になる。そのため、ILC 計画の設計思想においては、超伝導加速空洞といえども、高周波電力を常時加速空洞に供給することはできない。そのため、パンチのトレイン化が必要になる。粒子のパンチトレインが通過するときのみ、高周波マイ

クロ波を供給する方式が取られている。これによって、加速空洞の発熱を低くすることができる。

ウ) ILC で求められる加速空洞及びクライオモジュール

ILC では長さ約 1m、直径約 10cm の 9 連加速空洞が開発されている。500GeV の運用時には、加速空洞が ILC 全体で 16,000 台必要とされる。

9 連加速空洞を 8～9 台まとめてワンセットとして、断熱した真空容器内に組み込む。これを「クライオモジュール (Cryomodule)」という。500GeV の運用時には、クライオモジュールが ILC 全体で 1,850 台必要とされる。容器は、「クライオスタット」(極低温保持容器) と呼ばれる。

超伝導加速空洞 (SCRF Cavity)



クライオモジュール (Cryomodules)



超伝導加速空洞チューニングマシン



(KEK-STF)

エ) ILC で求められる加速空洞の性能 (加速勾配)

粒子を「加速」させることは、スピードの増加とエネルギーの増加の双方を意味する。粒子を加速する装置のコアとなるのが、加速空洞であり、加速空洞の性能は、「加速勾配」(「加速電界」ともいう) という数値で表される。加速勾配は、粒子が 1 m 進む間にどれだけのエネルギーを得られるかを示す数値のこと。加速勾配が高ければ高いほど、直線型加速器の長さを短くすることができる。

ILC では、現在 35MV/m (運転時 31.5MV/m) を目標にしている。超伝導加速空洞の加速勾配は、約 30 年前では 5MV/m の水準であったが、その後技術開発が進み、現在では、ILC のための超伝導加速空洞は実用化のレベルに達している。

加速勾配が大きいと加速器全体を短くでき、土木費用等を削減できる。また、コンポーネントの数も減らすことができる。一方で、高周波電力源や冷凍システムの規模が大きくなるので、その分の費用は増大する。これらを総合的に捉えると、ILC (500GeV) を前提とすると、加速勾配は 30~45MV/m が適当と考えられている。

将来、ILC を仮に 10 年後に 1TeV に増強した場合には、10 年後の加速空洞の性能や全体のコスト計算の中で、最適な加速勾配の値が決まることになる。

オ) ILC の加速空洞の性能 (加速勾配) を上げるための技術開発

将来 (衝突エネルギー 1TeV での運用) に向けて ILC の超伝導加速空洞の性能 (加速勾配) を向上させるためには、次の 3 つの方向があるとされている。

■ 加速空洞の表面処理の高度化

加速空洞内に凸凹があると放電がおこりやすく、そこから超伝導状態が破れてしまう。このため、空洞内部の表面をいかにきれいに滑らかにするかが性能向上に向けての大きな課題とされている。

空洞表面処理関連のこれまでの技術開発	概要
高性能高解像度カメラ (通称:「京都・KEK カメラ」)	「京都・KEK カメラ」は 2008 年に京都大学と KEK の共同研究から生まれた装置。鏡面に近いため撮影が難しい超伝導空洞の内表面の様子を、はっきりと映し出すことができる。加速空洞の性能向上に大きく貢献しており、海外の研究所でも使用されている。
温度マップ	空洞の外表面に温度センサーを貼りつけ温度上昇の分布測定。これによりクエンチを起こしたときの発熱場所を特定可能になった。
局所研磨機	シリンダー内に格納されたパンタグラフを空洞内で広げ、その先端に取り付けた研磨シートをモーターで回転させることで表面を磨く装置
電解研磨機	欠陥が生じないような製造方法の確立が必要。その鍵になるのが電解研磨機。電解研磨によって表面に付着する硫黄を界面活性剤ではがしてから高圧洗浄をかけるなどの処理も必要。
クリーンルーム + α	

京都・KEK カメラ



(KEK-STF)

■加速空洞に使う材料の改善

現在の超伝導加速空洞には、純ニオブが使われている。非常に高い純度を達成しているが、素材の表面処理技術、不純物を取除く技術、新たな素材の開発等が課題とされている。

特に、素材の表面物理としては以下があげられる。

超伝導加速空洞の素材はニオブであり、ニオブの表面は空気に触れると酸化する性質を持つ。ニオブの表面から酸素を取り除けば性能が向上すること、すなわち、空洞内の表面から水素や酸素が減るとエネルギーのロスが少なくなる（＝超伝導状態が良好になる）ことが研究により確認されている。その他、空洞を温める方法、温めたときに窒素ガスを入れる方法、表面に薄い膜を貼る方法など様々なアイデアが出されているが研究の途上である。空洞の加速勾配をあげるためには、材料面での研究開発がさらに必要とされている。

■加速空洞形状の改善

加速空洞形状の改善の方向は、空洞の中心軸付近の電界（加速電界）を大きくしつつ、空洞表面の電界を小さくすること。しかし、その際には、空洞の表面磁場の問題が発生する。空洞表面の磁場による理論限界が存在し、磁場がある値より大きいと超伝導状態が維持できないというもの。磁場の大きさは空洞の形状で決まるため、加速電界を大きくしつつ、表面磁場を抑えるような加速空洞の形状に改善することが求められる。

この点、これまで標準であった「テスラ型加速空洞」（ドイツの DESY のテスラ実験で開発された加速空洞）を、KEK は形状を変更した、一つは「テスラ改善型（TESLA-like）空洞」と呼ばれるもので、42MV/m の加速勾配を達成している。一方、KEK 独自の「低損失型（Low-Loss）空洞」も開発している。これは 1 セル型と 9 セル型があり、1 セル型では 51MV/m の水準、9 セル型では 40MV/m の水準を達成している。

カ) 加速空洞へ高周波を送る仕組み・装置 (クライストロン)

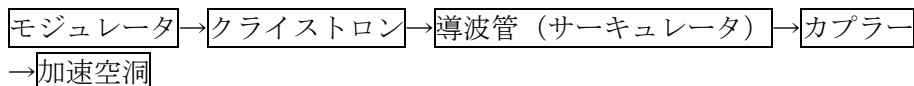
超伝導加速空洞で粒子 (電子・陽電子) のバンチを加速するためには、加速空洞の中に高周波/マイクロ波を入れ電場をつくる必要がある。

加速空洞に入れる高周波を増幅するのが、「クライストロン」という装置である。1台のクライストロンで、数10台の加速空洞に高周波を供給することが可能。したがって、ILCでは約50mの間隔でクライストロンが配置される。

クライストロン周りで必要になる高周波関連の機器・システムとしては以下が挙げられる。全体をRFステーションと呼ぶことがある。

- モジュレータ (パルス電源装置)
- クライストロン
- 導波管、ダミーロード、サーキュレータ、カプラー
- デジタルRF制御システム

加速空洞への高周波の供給の主な流れは、次のとおりである。



モジュレータ (マルクス型)



マルチビームクライストロン

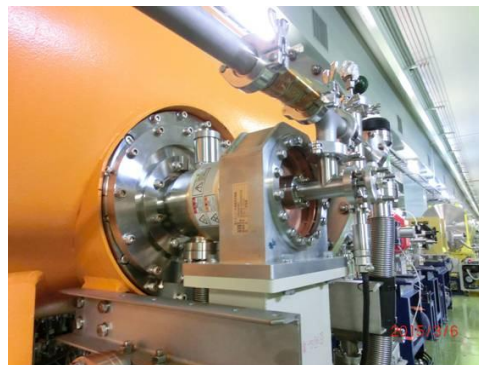


(KEK-STF)

クライストロン → 導波管



カプラー



(KEK-STF)

■高周波、マイクロ波とは

- ・高周波とは、明確な定義はないが、相対的に波長が短い、振動数が多い電磁波のことを意味する。周波数は、1秒あたりに起きる振動回数のこと。単位はヘルツ(Hz)で表示。
- ・一般的に、周波数 3000GHz 以下、波長 1km~1m の電磁波は「電波」と呼ばれている。明確な定義はないようであるが、電波のうち、周波数が 300MHz から 300GHz、波長が 1m から 1mm 程度の電波は「マイクロ波」と呼ばれている。

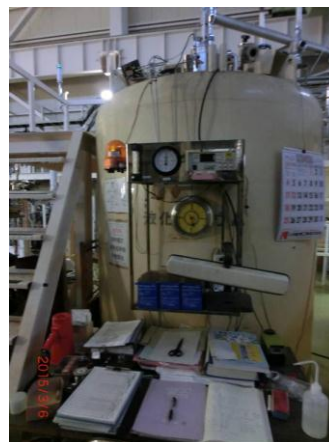
キ) 加速空洞を冷却する仕組み・装置

加速空洞を超伝導状態にするためには、冷却システムが必要となる。

ニオブ(金属)で作られた加速空洞は、超伝導に保つため、2K(ケルビン、絶対温度)の液体ヘリウムにつけられている。ニオブは液体ヘリウムの温度(4K)で超伝導状態になるが、残留抵抗の低減やヘリウムの熱伝導を考慮して、さらに2Kまで冷やす。なお、ILCの加速空洞全てを冷やすためのヘリウム量は100トンほどになる。

液体ヘリウムを供給する設備は、クライオジェニックプラントなどと呼ばれ、ヘリウム圧縮器、ヘリウム冷凍機、ヘリウム液化器、クライオプラント、ヘリウム輸送ライン等から構成される。

ヘリウム液化/冷凍機



(KEK-STF)

⑤最終収束・衝突部（電子と陽電子のビームを最終収束し衝突させる部分）

ア）粒子ビームを絞り込む必要性と方法

ILC では、ダンピングリングで低エミッタンス化された後、主線形加速器で加速された電子・陽電子の衝突確率を、さらに高めるための仕組みが組み込まれている。

粒子の衝突確率を高めるための状態を表す指標が、「ルミノシティ（輝度、明るさ）」と呼ばれるものである。

ルミノシティは、以下の式で表わされる。

$$\text{ルミノシティ} = 1 \text{ 秒間に交差する電子と陽電子の数} / \text{電子・陽電子のバンチの断面積}$$

加速器において、高いルミノシティを得るためには、大きく次の3つの方法がある。

- a) 粒子（電子と陽電子）の数を増やす
- b) 粒子を交差させる回数を増やす
- c) 粒子の密度を上げる

線形加速器である ILC では、円形加速器と異なり上記の a) 又は b) をやろうとすると電力消費量の増大に直接結びつくため、粒子数や衝突回数は設計条件が許す範囲内で最大限に大きくしている。ILC では、粒子の密度を上げることが、ルミノシティを高くする鍵となるが、粒子密度を上げることに限界があり、余りに高い密度のバンチ同士を衝突させると、衝突中にバンチ構造が破壊されルミノシティが向上しない。

限られた電力でルミノシティを高くするためには、分母の「電子・陽電子のバンチの断面積」を小さくすることによって粒子の密度を上げることが求められる。また、電子・陽電子のバンチの断面積を小さくするためには、粒子ビームをさらに小さく絞ることが必要となる。

粒子ビームを絞る方法は、光をレンズで絞る方法と原理は似ている。粒子ビームでは、レンズの代わりに、四重極電磁石を使う。

イ）粒子ビームの絞り込みの目標と技術

ILC では、衝突点付近でビームを垂直方向 6 ナノメートル（ナノメートル＝ 100 万分の 1mm）、水平方向 474 ナノメートルに絞り込むことが目標として設定されている。

このような非常に小さなナノ・ビームを作るためには、ダンピングリングにおいて行なう「超平行ビーム」の生成に加えて、磁場の強度分布の変化が急でしかも精密に制御された「高精度高勾配収束電磁石システム」によるビームの絞り技術、またナノ・ビームを正確に衝突させるために衝突位置のズレをナノメートル精度で制御する技術も不可欠となる。

このようなナノ・ビーム制御技術については、日本 KEK の ATF（先端加速器試験施設）が世界で唯一の開発拠点となっている。

ウ）粒子ビームを絞り込む装置（ビーム伝送システム<BDS>）

ILC では、主線形加速器から出てきた粒子ビームは、コリメータ群によってビームハロー（余分な裾野）を取り除いた後、最終収束部分（絞り込み用のビームライン）

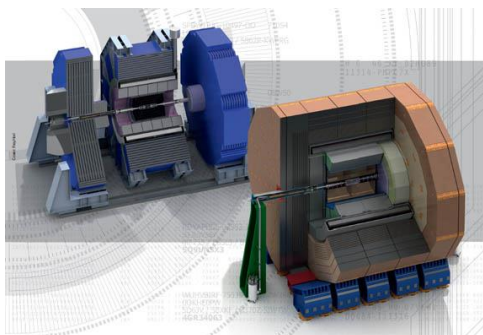
において、前記の方法と技術を用いて絞りこまれる。主加速器出口からビーム衝突点までを、ビーム伝送システム（BDS : Beam Delivery System）という。

ILC で予定される BDS は全体で 2km、うち最終収束部分は、衝突点の両側それぞれ 700m 程度になる。

エ) 粒子衝突を計測する測定器（検出器）

電子・陽電子衝突の結果として生じる新しい粒子を計測するために必要な測定器については、世界の研究者が協力して 2 つのタイプ（ILD 及び SiD）のものを設計中である。日本は主に ILD の設計活動に参画している。

測定器（ILD 及び SiD）



(3) ILC 技術の系譜

【ILC の流れ】

① ILC の超伝導加速器技術活用への方向決定

2004年8月 ITRP（国際技術勧告委員会）が出した決定に基づき、ICFA（将来加速器国際委員会）は ILC の主線形加速器を「超伝導加速器技術」に統一すると決定。また、超伝導加速空洞を用いたリニアコライダの建設を国際協力によって目指すことを決定した。

② ILC の基準設計報告書（RDR）の作成

2005年以降、ILC の「基準設計報告書（RDR）」が作成され 2007年に発表された。その際には、目標とする加速勾配の設定が最も難しい課題として議論された。当時の DESY でも 35MV/m の数値を出していた超伝導加速空洞は数台のみであった。結局、超伝導加速空洞のベースラインは、35MV/m（この基準を超えたものを合格品として使用）。実際の運転時は、90%の 31.5MV/m で稼働を目標に設定された。同時に、将来の 1TeV アップグレードに備えて、45MV/m の加速空洞の準備を進めることに決着した。

③ ILC の技術開発の推進と技術設計報告書（TDR）の公表

2005年に発足した ILC 加速器設計国際チーム（GDE : Global Design Effort）は、超伝導高周波加速技術を基盤とした ILC 加速器技術開発及び設計研究を進め、2013年6月に ILC の「技術設計報告書（TDR）」を公表した。

TDR の作成と平行して、2007年～2012年の間は、技術開発段階（Technical Design Phase）として位置づけられ、各国の研究所の連携のもとで、次の項目について系統的な技術開発と検討が積み重ねられた。

- 超伝導加速空洞の電界性能及び安定性の向上
- クライオモジュールシステムとしての性能検証
- 超伝導加速空洞によるビーム加速実証
- 超伝導加速器の構成要素の工業化技術開発及び産学連携の推進

こうした ILC の技術開発の中で、日本において中心的な役割を担っているのが KEK である。

【日本（KEK）の流れ】

① KEK : トリスタン

周長 3Km の円形加速器。特徴は、電子・陽電子コライダであったこと、超伝導加速空洞を使用したことであり、世界で初めて超伝導での加速装置（空洞）の実用化に成功し、その加速装置（空洞）の製造技術が、ドイツ DESY で開発された新型の加速空洞の基盤として用いられている。衝突エネルギーは 64GeV。米国の SLC や CERN の LEP に抜かれるまでは、世界最高性能を保持した。

②KEK：トリスタン以後

KEKでは、Cバンド、Xバンドの「常伝導加速空洞」の開発に取り組んでいたが、2004年にILCの主線形加速器が「超伝導加速器技術」に統一されるという決定を受けて、「超伝導加速空洞」の開発に大きく方向転換した。

③KEK：STF（超伝導RF試験施設）

2005年、KEKにSTF（Superconducting RF Test Facility:超伝導RF試験施設）が設置された。STFは、ILCの超伝導加速空洞に関連する日本の研究開発拠点として重要な役割を担っている。そこでの試験計画は以下のとおりである。

■フェーズ1（2005年～2008年）：ILC用の超伝導加速空洞の開発と試作、クライオモジュールの動作試験（絶対温度2度に冷却した時のパルスRFによる動作確認）を実施。

■フェーズ2（2009年～2013年）：ILC線形加速器のプロトタイプ建設、粒子ビームを使った運用試験の実施。並行して、大規模加速器で必要となる、機材生産技術の工業化の模索を本格化する計画

④KEK：S1グローバル：

2008年10月から約2年半の間、KEKのSTFにおいてILC用のクライオモジュール試験の第一段階（S1グローバル）が実施された。ドイツ（DESY）2台、米国（FNAL）2台、日本（KEK）4台のクライオモジュールをKEKへ持込み、相互連結し性能試験を行なった。

ドイツ・米国の4台はイタリア（INFN）のクライオスタット（極低温保持容器）に入れ、日本の4台はKEKのクライオスタットに入れ、両者を連結し、1台のクライオモジュールを組立て、1台のクライストロンよりマイクロ波を供給し運転のデモンストレーションを実施。その結果、8台のうち7台は協調運転に成功し（1台は調整に不具合発生）、全体で26MV/mの平均加速勾配（加速電界）を達成。クライオモジュールを構成する各種機器が十分に機能して動作していることが実証された。

⑤KEK：CFF（Cavity Fabrication Facility:空洞製造技術開発施設）

ILCでは、EURO-XFELの計画で使用される超伝導加速空洞（800台程度）に比較して、高い加速勾配を達成しつつ、製造コストを抑え、なおかつ高い歩留まりで1桁以上多い台数の超伝導加速空洞を製造する必要がある。このため、KEKは、超伝導加速空洞の性能向上と製造方法の研究を進めるための工作施設であるCFF（空洞製造技術開発施設）を設置した。CFFでは性能を高めつつより製造コストを抑えた9セル超伝導加速空洞の製造方法に関する研究開発を進めている。

CFFの特徴は、ニオブ材料から超伝導加速空洞を製造するために必要な、プレス機、縦型旋盤、表面検査機、化学研磨機、電子ビーム溶接機等が、清浄な環境を維持した1つの建屋内に設置されており、建屋内で9セル超伝導加速空洞を製造するほとんどの工程を行うことができるという点である。

⑥KEK：ATF（先端加速器試験施設）

ATFはILCに必要な高安定な超低エミッタンスビームの生成とその位置制御に焦点を合わせた開発研究を行っている試験加速器である。ATFはILCの電子側直線加速器の入射加速器と同じ構成となっており、電子銃部、直線型電子加速器、粒子の平行度を高めるダンピングリング（円形加速器）、ビーム取り出し計測ライン、電磁石でビームを極小に絞り込む最終収束ビームライン(ATF2)から構成される。

ダンピングリングでは、従来の加速器に比較して約100倍も平行度の良い「超平行ビーム」をつくることが可能。現在稼働しているこの種の試験加速器は、世界でもATFのみであり、世界中から研究者が集まり研究開発が進められている。

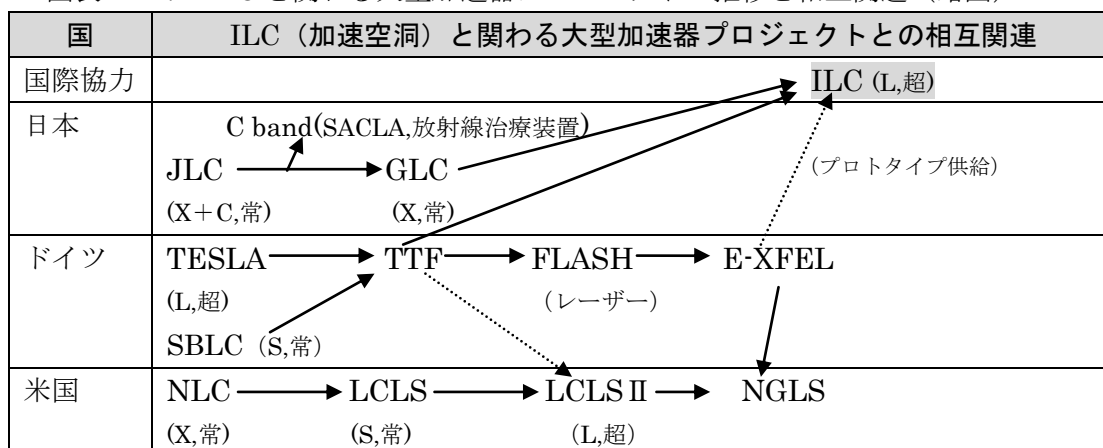
【欧米の流れ】

ILCの採用する超伝導加速空洞の技術開発は、DESY（独）、CEA-Saclay（仏）、FNAL（米）、SLAC（米）、KEK（日）等が連携して進められてきた。その牽引的役割を担ってきたのがDESYである。DESYを中核としたTESLA計画やFLASH計画の中で進められた技術開発と蓄積が牽引力となり、各国主要研究所の連携による技術開発の結果、ILC仕様の超伝導加速空洞の品質が向上してきた。

具体的には、DESYが、EXFEL（ヨーロッパXFEL）に使用している超伝導加速空洞は、TESLAの時に開発したもの（TESLAキャビティと言われる9連の1.3GHz）を使用しており、これは、ILCの加速空洞のプロトタイプとして位置づけられている。

ILC用の超伝導加速空洞（KEK）は、9連等の形状面ではTESLAキャビティとほとんど変わらないが、細部は若干異なっている。また、超伝導加速空洞の電界性能（加速勾配）がEXFELの23.6MV/mであるのに対して、ILCは31.5MV/mとハイスペックになっている。

図表 I-27 ILC と関わる大型加速器プロジェクトの推移と相互関連 (略図)



(注)

JLC : Japan Linear Collider

GLC : Global Linear Collider

ILC : International Linear Collider

TESLA : TeV Energy Superconducting Linear Accelerator

SBLC : SBand Linear Collider

TTF : TESLA Test Facility

FLASH : Free-electron laser FLASH

E-XFEL : European X-Ray Free-Electron Laser

NLC : Next Linear Collider

LCLS : Linac Coherent Light Source

NGLS : Next Generation Light Source

X : X band (10GHz)、C : C band (6GHz)、S : S band (3GHz)、

L : L band (1.3GHz)

常 : 常伝導、 超 : 超伝導

(出所) 企業、研究機関等へのインタビュー結果をもとに作成

(2) ILC の技術・機器体系の整理概要

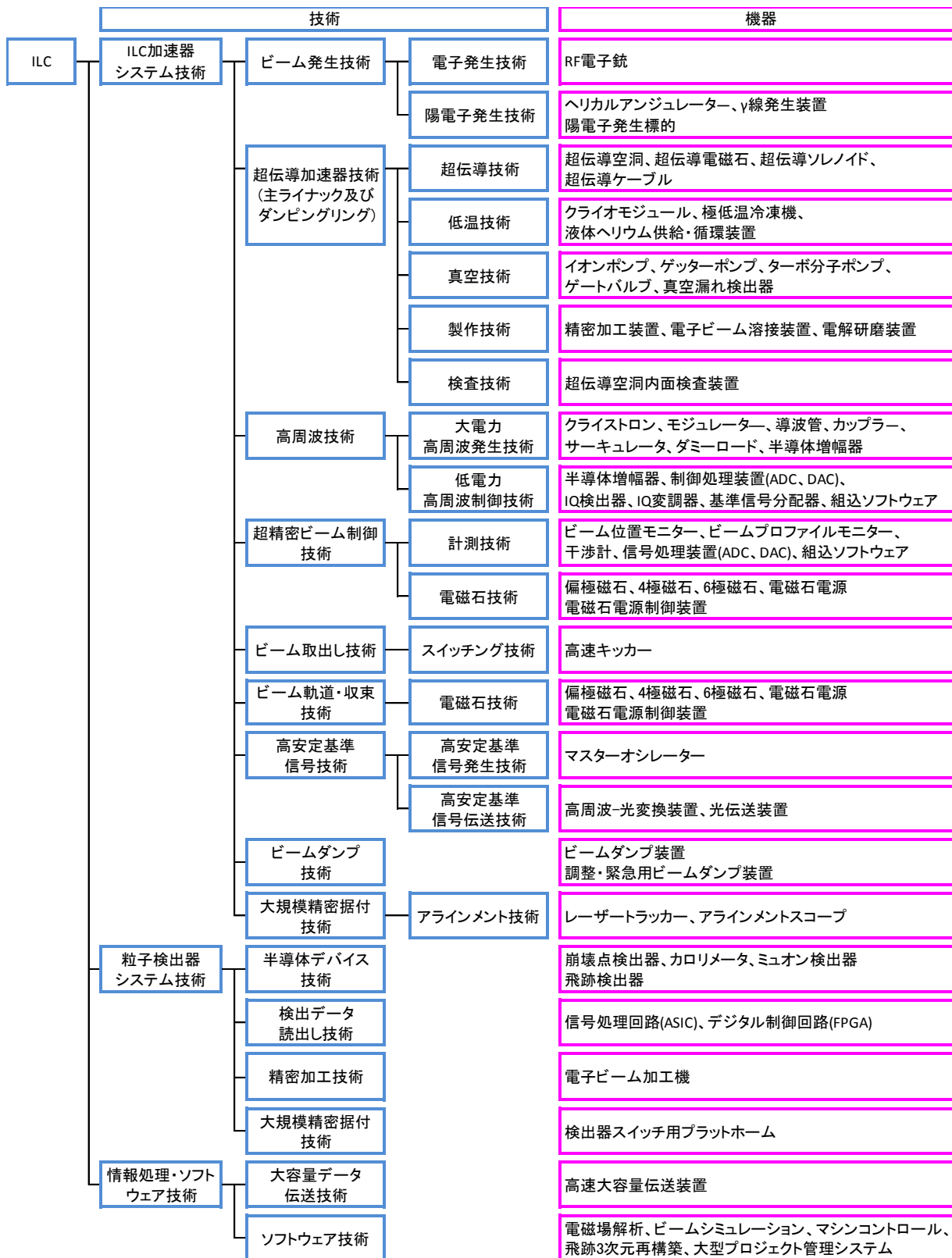
高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の「ILC 技術の波及効果」(2007 年 7 月) [1]、予算当局委員会 (Funding Agency for Large Collider、以下、「FALC」) の「FALC Technology Benefits study」(2007 年 2 月) [2]、ILC の技術設計報告書 (Technical Design Report、以下、「TDR」) (2013 年 6 月) [3]を中心に関連する文献を調査するとともに、有識者へのヒアリングと提供された情報を基に、ILC の技術・機器体系の整理を行う。

図表 I - 28 参考文献の例

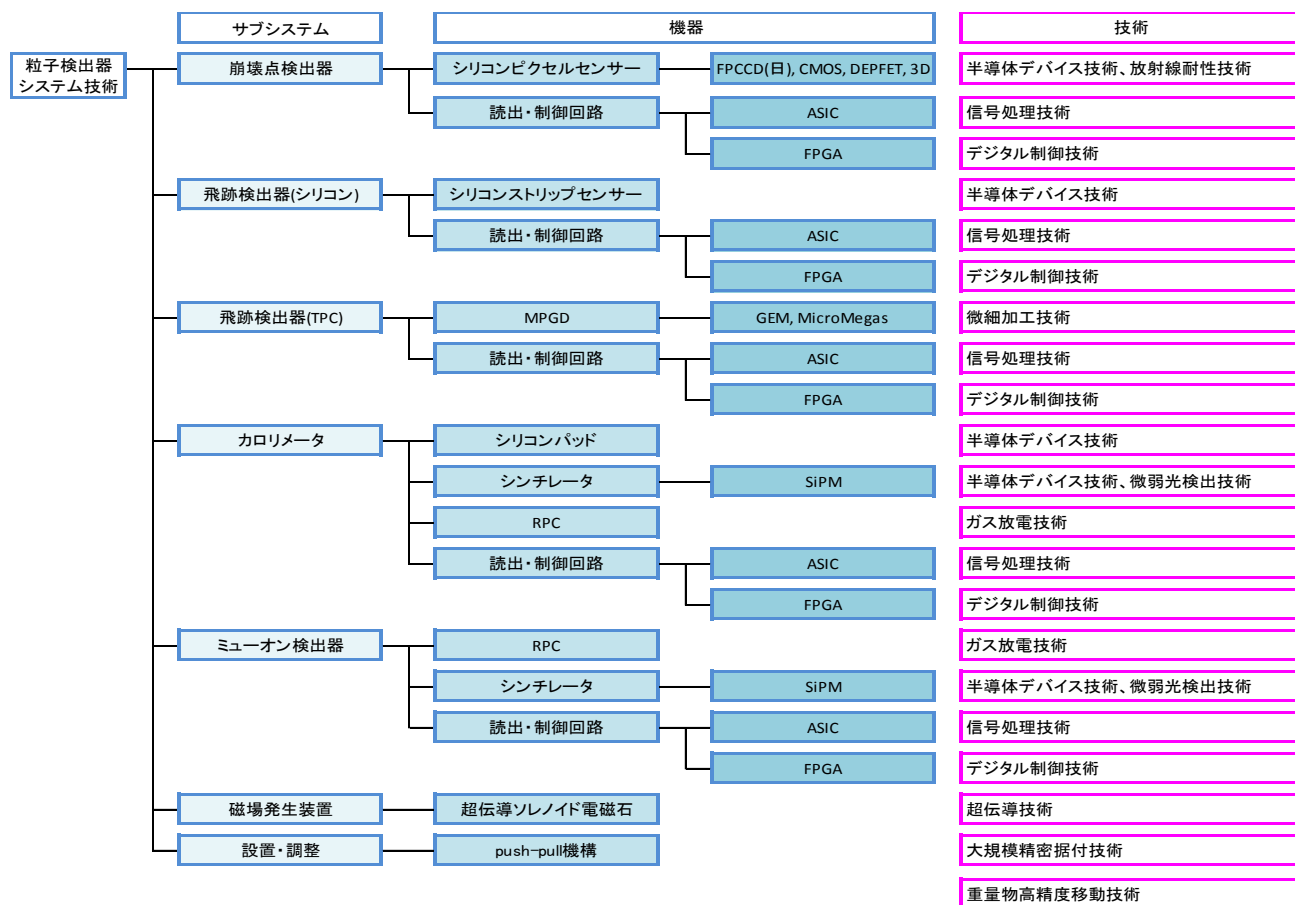


ILC の実現に必要とされている技術及び設備・機器等の階層体系を示すと下図表のとおりである。

図表 I - 29 ILC の技術・機器の階層体系



図表 I - 30 ILC の検出器の技術・機器の階層体系



FPCCD Fine Pixel CCD
 ASIC Application Specific Integrated Circuit
 TPC Time Projection Chamber
 MPGD Micro Pattern Gas Detector
 GEM Gas Electron Multiplier
 MicroMegas Micro-Mesh Gaseous Structure
 RPC Resistive Plate Chamber
 SiPM Silicon Photo Multiplier

(3) ILC の技術・製品の現状と今後の開発課題

国内外の主要な研究機関及び関連企業へのインタビュー結果等をもとに、ILC の実現に必要とされる技術・機器等の現状及び今後の開発課題について取りまとめると、以下のとおりである。

① ILC の技術についての現状認識

ILC の技術設計報告書 (TDR) に示される ILC の設計思想は、技術的な実現可能性を重視し「概ね完成された技術で建設する」としていることである。

したがって、ILC の主要技術であるビーム発生技術、超伝導加速空洞技術、高周波技術、クライオジェニック技術等については、基本的にこれまでに開発・実証された技術を使うことが前提となっている。

このため、欧米の主要研究機関や企業へのインタビュー調査では、ILC の準備・建設段階において、これまでにない新しい技術開発が必要になる余地は少ないとの認識が多く示された。

しかし一方で、ILC の仕様 (将来の拡張計画を含む) を満たすためには、特に工業化 (量産・低コスト化) に向けた技術開発、個々の装置・機器の性能水準向上のための技術開発 (ナノ・ビーム制御等) の要素は多く残されており、それら分野における要素技術の更なる成熟やイノベーションは必要になると指摘されている。

さらに、構造仕様を前提に計画されているため専門的な知識と経験を持つスタッフの充実が不可欠であることも指摘されている。

② ILC の主要な技術・機器等の今後の開発課題

ILC の実現に必要とされる装置・機器別の想定規模 (TDR ベースの概数)、主な機能・特徴、開発の現状と課題を次図表に示す。また、今後の開発課題の要点を、以下に示す。

■ 量産化 (工業化) のための技術開発

< 量産化の対象 >

超伝導加速空洞、クライオモジュール、電磁石、クライストロン、カップラー、導波管、導波管素子 (ダミーロード、サーキュレーター等) など

< 技術開発課題 >

- ・ 生産工程の自動化・ロボット化技術
- ・ 検査・試験・改良のフィードバックループの効率化技術
- ・ 生産・アSEMBル拠点のグローバルロジスティクスとサプライチェーンマネジメント技術

■ 装置・機器の性能水準向上のための技術開発

- ・ 超伝導加速空洞の電界性能向上
⇒ 加速空洞の表面処理の高度化、加速空洞の素材改善、加速空洞形状の改善等
- ・ クライオモジュール単位の電界性能の向上
- ・ 陽電子ビーム発生技術

- ⇒アンジュレータ方式による偏極陽電子生成技術の確立 等
- ・ナノ・ビーム制御技術
 - ⇒粒子ビームの絞込み技術、ビームをナノメートル精度で制御する技術 等
- ・モジュレータ（パルス電源）の小型化・安定化
 - ⇒マルクス型電源の信頼性向上 等
- ・クライストロンの性能向上
 - ⇒電力エネルギー変換効率の向上、RF コンディショニング時間短縮技術 等
- ・カプラーの高出力化

■インテグレーションのための技術開発

- ・(in-kind 方式による ILC 建設を前提とした場合) インテグレーション技術の開発
 - ⇒機器・システム、ノウハウ、共同ワークのインテグレーション技術
(特に日本が中心になる場合、欧米システムとの調整を如何に適切に行うか)

■全体マシンコントロール(制御)システムの開発

- ・大規模精密機器・システム全体のコントロール技術

■大規模データ処理・管理ソフトウェアの開発

- ・ILC 建設・実現のためのエンジニアリング・データマネジメントのソフト開発
 - ⇒ILC 固有の EDMS (Engineering Data Management System) の開発 等
- ・電子-陽電子衝突実験による大量データ処理技術・ソフト開発
 - ⇒CERN の LHC で開発・活用されたコンピュータ・グリッドのような技術

図表 I - 31 ILC の装置・機器の規模、機能・特徴及び開発の現状・課題 <その 1 >

No	技術	設備	装置・機器	想定数 (TDR)	主な機能	技術開発の現状	技術開発の課題
ビーム発生技術							
1	電子ビーム発生技術	電子源	RF 電子銃	1	フェムト秒フォトカソード(GaAs 超格子カソード)を用いレーザーにより励起され電極から引き出される偏極電子ビームを発生する装置	<ul style="list-style-type: none"> • KEK で電子ビーム加速実証試験実施 (STF 加速器) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 電子銃に開発要素の可能性あり ⇒ 電子銃の劣化問題への対応 ⇒ レーザーの性能向上 ⇒ 引き出し部分の RF 構造 ⇒ フォトカソード飛出し部分の表面条件等
2	陽電子ビーム発生技術	陽電子源	ヘリカル アンジュレータ γ線発生装置	1 or 1	円偏向γ線を使って、偏極陽電子ビームを発生するための装置 ※アンジュレータ(147m、150~250 GeV の電子ビームを通す) 同上	<ul style="list-style-type: none"> • アンジュレータを使わない低エネルギーでのレーザーと電子ビームをぶつけてγ線を生成させる実験は多数あり 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 陽電子ビーム発生技術の開発 ⇒ ILC で想定陽電子源は長距離×高エネルギー(150~250GeV)のため、ILC 建設前に実証・検証できないという問題の指摘あり
超伝導加速器技術							
1	超伝導技術	主ライナック及びダンピングリング	超伝導高周波加速空洞 (SCRF 空洞)	16,000	外部より入力された高周波により電子・陽電子を加速するための機器 = L バンド(1.3GHz)超伝導加速空洞 (要求電解性能: 31.5MV/m)	<ul style="list-style-type: none"> • ILC 用 SCRF 空洞の原型は DESY の TESLA キャビティ。EXFEL で使用<全 800 台(23.6 MV/m)、RI400 台、Zanon400 台供給。工業化・実装段階、2015 年末供給完了。2016 年中に運転開始予定> • ILC 用国産 SCRF 空洞は、KEK において実証段階。三菱重工(30 台)、日立、東芝等が空洞を供給。平均 35 MV/m 以上達成。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ILC 加速空洞そのものの革新的技術革新は起らないとの認識多い(EXFEL のプロトタイプでほぼ確立済) ■ ILC 加速空洞の量産化(工業化)技術の開発が必須 ⇒ 参画企業の空洞生産能力を数倍拡大必要 (国際協調による製造を前提) ⇒ 空洞の生産工程の革新必要(ロボット化等) ⇒ 空洞生産拠点とクライオモジュール組立拠点のグローバル配置の検討、サプライチェーンマネジメント導入が必要 ■ in-kind 貢献を前提とした場合、機器・システムのインテグレーション技術、インテグレーションワーク体制確立が重要

			超伝導電磁石	150	高ルミノシティを達成するためビーム軌道・位置制御やビーム径を細くしナノ・ビーム生成に用いる装置。 超伝導磁石はクライオモジュール(各1台)、最終収束点に必要 ILC全体で数百個必要	<ul style="list-style-type: none"> ILCの最終収束点用の超伝導マグネットは米国で開発済み KEKにてILC最終収束モデル化・ナノビーム技術検証中(KEK-ATF2) ATFで2014年6月に実証されたビームサイズは44nm(ILCのエネルギーに換算すると7nm)。目標は、ATFで37nm。(ILCのエネルギーで5.9nm) 	<ul style="list-style-type: none"> ILC超伝導磁石(数百個)を所定のコスト内で量産するための技術開発必要 ⇒人の手間をかけない新製法(自動生産技術等)のR&D ILCではRF空洞と超伝導磁石の混在による磁場の影響等が問題になる可能性あり ナノ・ビームの制御技術開発と実証(ほぼ実証済み) ⇒最終収束ポイントでの目標ビームサイズ(37nm)をほぼ達成(44nm) ⇒ダンピングリングでの超低エミッタンス(4pm)の達成 	
2	低温技術	主ライナック及びダンピングリング	クライオモジュール	1,850 (全体として)	超伝導空洞、液体ヘリウム供給・回収配管等と真空容器からなる装置	<ul style="list-style-type: none"> ILC用クライオモジュールのプロトタイプはEXFEL用のモジュール<EXFEL:全100台。工業化・実装段階。2016年中に運転開始予定> ILC用国産クライオモジュールはKEKにおいて実証段階(KEK-STF)。S1グローバルでは、ドイツ、米国、日本の7台の超伝導加速空洞によるストリング・協調運転に成功(2010年) 	<ul style="list-style-type: none"> クライオモジュール単位での電界性能向上(空洞単体に比較して連携の性能はやや劣るが目標性能はほぼ達成) ILC用モジュールの量産化(工業化)の技術・システム開発が必須 ⇒モジュールの生産能力を数倍に拡大必要 ⇒世界3拠点程度のモジュール組立拠点必要(1カ所では投資莫大になる) 国際協力による建設方式を前提とした場合、機器・システムのインテグレーション 	
			冷凍機プラント	低温冷凍機	90	液体ヘリウムを2°Kに冷却する装置	<ul style="list-style-type: none"> 低温冷凍機の技術は既に確立 ヘリウム資源の調達をスムーズに行うため供給先の複数化が重要との認識 	<ul style="list-style-type: none"> 冷凍機心臓部は海外に依存せざるを得ない状況にあり、国産化が期待されるが、長期的に安定した市場規模に限界
				液体ヘリウム供給回収装置		液体ヘリウムの温度を維持するための循環装置		
3	真空技術	主ライナック	イオンポンプ	3,150	真空容器内圧力を~0.1mTorrに維持する装置			
			ゲッターポンプ					
			ターボ分子ポンプ					
			ゲートバルブ	30	ある区間で真空低下等の異常検出により真空路を遮断分離する装置			
			真空漏れ検出器		真空容器内の真空度を監視し、異常時にインターロック信号を送出する装置			

4	製作技術	超伝導空洞製造ライン	電子ビーム溶接装置		超伝導空洞の部品を溶接し精密に組み立てるための装置。	<ul style="list-style-type: none"> ・ILC の 9 連加速空洞製作には必須の技術。試作空洞単体ベースでは技術確立 	<ul style="list-style-type: none"> ■ILC 加速空洞の量産段階では、電子ビーム溶接の設備・技術のレベル向上が必要 ■溶接不用の一体成型型のシームレス空洞の開発(ILC 1 TeV フェーズ)
		超伝導空洞製造ライン	電解研磨装置		超伝導空洞内面粗さを 2 μm 以内に仕上げる装置。硫酸とフッ酸の混合液を使用。中心のアルミ電極とニオブ空洞間に電圧をかけ、ニオブ空洞内面をエッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・ILC 用超伝導空洞の電界性能を出すために必須の技術。装置は開発・実装済み ・EXFEL では、電解研磨装置は企業(RI)が保有し運用 ・日本では KEK が保有し運用(企業保有無し) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ILC 加速空洞の量産段階での効率的検査システム・体制づくりが不可欠 ⇒量産化に対応した、大量空洞の内面検査・表面処理・性能試験のフィードバックループのプロセスづくり及び製造工程の簡略化 ⇒量産化段階では、生産現場(企業)に近い場所に電解研磨装置が必要 ■危険なフッ酸を使用しない電解研磨装置の開発
5	検査技術	超伝導空洞製造ライン	超伝導空洞内面検査装置		レーザーと CCD カメラの組合せによる 7 μm 分解能検査装置。	<ul style="list-style-type: none"> ・ILC では加速空洞の内部表面検査用の「京都・KEK カメラ」が開発・運用済み。ミクロン単位で表面検査可、ハレーションを起こさない等高性能な日本発先端技術 ・現在、「京都・KEK カメラ」は、日本発の先端技術として世界の研究所に提供されている (CESY, Fermilab, JLab 等) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ILC 加速空洞の量産化段階では、生産者(企業)側で「京都・KEK カメラ」を保有・運用することが必要
			超伝導加速空洞チューニングマシン			<ul style="list-style-type: none"> ・DESY が開発・製作し、現在世界に 4 台しかない。日本では KEK が保有。 ・ドイツの RI 社はチューニングマシンを保有 	<ul style="list-style-type: none"> ■ILC 加速空洞の量産化段階では、空洞チューニングマシンを生産者(企業)側で持つことが必要

高周波技術

1	大電力高周波発生技術	高周波電源	クライストロン	380	超伝導空洞に高周波信号を増幅し供給する装置。 10MW マルチビームクライストロン1台で26台の空洞に高周波を供給	<ul style="list-style-type: none"> ・東芝電子管デバイスと THALES(仏)は、ILC 用のクライストロンの開発に成功 ・THALES は、EXFEL へ 23 のマルチビームクライストロン(5.2MW)を供給し、Lバンド(1.3GHz)10MW ピークまで対応可能 ・ただし、現在のクライストロンは ILC の仕様は満たすが、電力エネルギー変換効率は6割程度にとどまる。 	<ul style="list-style-type: none"> ■ILC 用のクライストロンには2つのボトルネックの技術的解消が課題 ⇒バキュームポンピング(高電圧下の超真空技術) ⇒RF コンディショニング時間短縮技術 ■クライストロンの電力変換効率の向上が課題 ⇒効率を上げると省エネに効果。ILC 仕様を満たすクライストロンをさらに性能向上させることが、省電力化に向けて望まれる。 ■クライストロンの生産能力の向上が課題 ⇒ILC 世界のクライストロン供給能力は、ILC の需要(80 ユニット/年)の半分以下。企業の生産能力を高める必要あり
			モジュレーター	380	クライストロン出力にパルス変調を与える装置。	<ul style="list-style-type: none"> ・マルクスジェネレータ方式による製造実績製造実績は米国の SLAC のみ。国内開発中 	■技術移転による工業化と国産技術確立
	クライオモジュール	カプラー			高周波電源から導波管を通して伝送された高周波を超伝導空洞に供給するための装置	<ul style="list-style-type: none"> ・EXFEL 向けの超伝導 RF カプラーは、LAL(仏)により開発済み。ILC においてもその技術が使用可能 	■カプラーの高出力化、RF コンディショニング時間の短縮化が課題
		導波管			高周波電源の出力(電磁波)をカプラーに伝送するための装置 ※ILC 1 加速空洞につき 9 個の導波管想定	<ul style="list-style-type: none"> ・ILC の導波管は、成熟した技術を使ったものを想定 	■機器設置のための配置設計が必要 ⇒設置作業の効率化と機器間接続部材の仕様明確化で購入コストの削減を図る。
		ダミーロード	※27,200		疑似的に負荷を与え、電気エネルギーを熱エネルギーに変換して消費する装置 ※ILC クライオモジュール1台につき 16 個想定	<ul style="list-style-type: none"> ・KEK の STF や C-ERL 向けの L バンドのダミーロードは、日本高周波によって開発納入済み 	■導波管及び導波管素子(ダミーロード、サーキュレータ等)の量産化への対応が必要 ⇒短期間量産のため大幅な生産性向上(製造用のロボット開発、溶接ではなく鋳物で製造等) ⇒コスト低減の要求に対する構造簡略化及び無調整化 ⇒ダミーロードのコストダウンには電波吸収体の量を減らす必要あり
	サーキュレータ	※13,600		高周波信号の入力電力に対して反射電力が増加した時、機器保護のため入力をダミーロードに切り替える装置 ※クライオモジュール1台につき 8 個想定	<ul style="list-style-type: none"> ・KEK の STF や C-ERL 向けの L バンドのダミーロードは、日本高周波によって開発納入済み 		

2	低電力高周波制御技術	低電力RFシステム	半導体増幅器	380	クライストロンに高周波信号を供給する装置	
			信号処理装置(ADC+FPGA)	380	加速安定化のため高周波信号の振幅0.07%rms以下、位相0.24° rms以下の誤差にパルス内制御を行う装置。	
			信号処理装置(DAC+FPGA)	380	同上	
			IQ検出器	380	空洞からピックアップした高周波信号からIQ信号を生成する装置	
			IQ変調器	380	IQ信号から高周波電源の変調信号を生成する装置。	
			基準信号分配器	380	マスターオシレーターからの基準信号を基にクロックやトリガー信号を生成し各機器へ供給する装置	
超精密ビーム制御技術						
1	計測技術	主ライナック及びダンピングリング	ビーム位置モニター		2nm位置分解能でビーム位置を計測する装置。	■計測分解能技術確立
			信号処理装置(ADC+FPGA)		同上	
			ビームプロファイルモニター		ビームサイズ37nm(要求5.8nmから換算)、安定度2nmのナノ・ビームを計測する装置。	■測定分解能技術確立
			レーザー干渉計		同上	
2	電磁石技術	主ライナック及びダンピングリング	電磁石、電磁石電源電源制御装置		ビーム位置の誤差から算出された補正值により電磁石電源を制御し電磁石を駆動し位置修正を行う装置。	
ビーム取出し技術						
1	スイッチング技術	ダンピングリング	高速キッカー		ダンピングリング内で3~6ns間隔に圧縮されたバンチトレインを330ns間隔戻す装置。	
ビーム軌道・収束技術						

1	電磁石技術	最終収束点	電磁石、電磁石電源 電源制御装置		高いミノシティーを得るため電子及び陽電子ビームを絞り込み電流密度を上げる		
高安定基準信号技術							
1	高安定基準信号発生技術		マスター オシレーター	2	全システムの基準になる安定度 100fs 以下の信号を発生する装置であり、2 台の冗長システム。		
2	高安定基準信号伝送技術	主ライナック及び ダンピングリング	高周波・光変換装置		基準信号を光信号に変換或いは各装置に光で送られた信号を高周波信号に変換する装置。		
			光伝送装置		検出器からの位置からでも電子・陽電子加速器それぞれ 約 15 km に及ぶ距離に亘り光信号を伝送する装置。		■長距離光ファイバー安定化技術
ビームダンプ技術							
1		主ライナック及び ビーム輸送システム	ビームダンプ装置	4	不要となった電子・陽電子ビームを排出する 18MW 大型大型エネルギー吸収・回収システム		■ビームエネルギーの再利用の技術開発は必要
			調整・緊急用 ビームダンプ装置	2	立上げ再立上げ時の試験調整用及び故障等による機器保護のための大型エネルギー吸収・回収システム		
大規模精密据付技術							
1	アラインメント技術	主ライナック及び ダンピングリング	レーザートラッカー、アラインメントスコープ		加速器架台の据付精度 ・～1cm/数百 m：ビームライン垂直 ・～10cm/10km：ビームライン平行 主線形加速器・各機器の据え付け精度：0.1 mm レベル		■要求精度に対する地上モニユメント及び基準点の設置と地下に移設するための測量用の立坑の配置が必要

図表 I - 32 ILC の装置・機器の規模、機能・特徴及び開発の現状・課題 <その 2>

No	技術	設備	装置・機器	想定台数 (TDR 準拠)	主な機能	技術開発の現状	技術開発の課題
粒子検出器システム技術							
1	半導体デバイス技術	検出器	崩壊点検出器	1(SiD) 1(ILD)	素粒子の軌跡を逆にたどり枝分かれの場所(バーテックス=頂点)を調べる装置。		
			カロリメータ		粒子のエネルギーを測定するための装置。		
			ミュオン検出器		超伝導ソレノイド、シンチレータ・ストリップなどで構成されミュオンの通った位置と運動量を測定する装置。		
			飛跡検出器		シリコン・ストリップ、TPC などで構成され、粒子とガスの衝突でできる電子の情報から飛跡を測定する装置。		
2	検出データ読出し技術	検出器	信号処理装置(ADC+FPGA)		320Gbit/s(SiD の場合)の測定データをデジタル信号に変換し読出し記録装置等へ送出する装置。		
3	精密加工技術	電子ビーム加工機	中央飛跡検出器		検出器デバイスの微細穿孔加工をする装置。 電子ビーム加工機により数 μm 径の穿孔を行う。		
4	大規模超精密	検出器	検出器 Push-pull	2	超重量物の移動~1 日、位置精度±1 mm で SiD と ILD の入替を行うための装置。		
大容量データ伝送技術							
1		ILC 研究所及び	高速大容量伝送装置		検出器で測定したすべてのデータを記録装置等へ伝送する装置。		
ソフトウェア技術							
1			電磁場解析		ビーム軌道や収束のための電磁石の磁場計算や空洞内でのビーム相互作用な		
2			ビームシミュレーション		各種磁石、高周波空洞、挿入光源など様々な線形及び非線形要素で構成される粒子加速器の荷電粒子の軌道を計算し加速器の最終的デザインを決定する		

3		飛跡 3 次元再構築	衝突実験で発生する崩壊粒子の飛跡データを基に再構築する技術		
4		マシンコントロールシステム	タイミング制御、インターロック制御、機器診断及びログなど	システムは EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)と呼ばれる開発環境を使用。	■ILC の複雑な機械・設備をコントロールするシステム開発が課題
5		大型プロジェクト管理システム	ILC のような巨大施設建設に不可欠な設計・調達・設置・試験等の進捗状況を管理する技術。	<ul style="list-style-type: none"> ・ DESY は、EXFEL 用に EDMS(データ管理システム)を開発し、クライオモジュールの検査環境を大きく改善した。 ・ CERN も「LHC Management Tools Application to ILC」を提案している。 	■ILC 用の EDMS(Engineering Data Management System)の開発が課題

5) ILC 製作がもたらす次世代の産業向け加速器の方向

(1) ILC 製作がもたらす次世代産業向け加速器の見通し

ILC の製作に伴う技術開発の波及効果として新しく開発されると考えられる次世代加速器の実現見通しについて、ILC 製作技術に関連する機器・装置の例とともに下図表に示す。

ILC の技術に基づくものとして以下を判断基準とした。

- ① ILC の超伝導空洞などを流用した加速器:(例)9 セル超伝導空洞など
- ② ILC の超伝導空洞などの設計技術を活用して製造された加速器:(例)シングルセル～5・7セル超伝導空洞など
- ③ ILC の製造及び検査プロセスを使用した加速器:(例)QWR(Quarter Wave Resonator:1/4 波長空洞共振器)、スポーク超伝導空洞など

図表 I - 33 新しい加速器関連機器・装置の実現見通し概要(■研究用、■産業/学術用)

		技術																					
		超伝導技術	低温技術	真空技術	大規模精密据付技術	大電力高周波発生技術	高周波加速安定化技術	信号処理ソフトウェア技術	高安定基準信号発生技術	高安定基準信号伝送技術	電子発生技術	陽電子発生技術	計測技術	超精密ビーム制御技術	ビームダンプ技術	半導体デバイス技術	検出データ読み出し技術	大容量データ伝送技術	ソフトウェア技術	加工技術	検査技術		
○: 技術的関連性に該当するもの																							
ILC 製作技術に関連する機器・装置の例と実現見通し																							
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	ERL, NGLS (次世代放射光自由電子レーザー施設)	2020年代初め頃
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	LCLS II (既存Linacへの超伝導Linac増設)	2010年代終わり
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	FCC, CEPC (超大型円形衝突型加速器)	2020年代終わり～2040年台
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	eRHIC (電子-重イオン衝突型加速器)	2020年代半ば
1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	半導体製造用露光装置光源 (EUV光源)	2020年代初め頃
2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	ADS (核変換施設)	2030年代に実証施設
3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	レーザーコンプトンγ線発生装置 (核セキュリティ)	開発中
4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	レーザーコンプトンγ線派生装置 (非破壊検査)	開発中
5			○			○				○												スピン偏極走査型トンネル顕微鏡 (先端デバイス構造解析装置)	既流通(独Omicron他)
6			○			○				○												偏極低エネルギー電子顕微鏡 (先端材料解析装置)	既流通(独ELMITEC他)
7	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	小型放射光装置 (Lab用放射光装置)	?2020年頃
8	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	RI製造装置など (小型多用途超伝導電子加速器)	2010年代後半

- ERL Energy Recovery Linac
- NGLS Next Generation Light Source
- EUV Extreme Ultra Violet
- ADS Accelerator Driven System
- NMR Nuclear Magnetic Resonance
- MRI Magnetic Resonance Imaging
- Mu2e Muon to Electron
- LCLS Linac Coherent Light Source
- SPLiEM Spin-Polarized Low-Energy Electron Microscopy
- FCC Future Circular Collider
- CEPC Circular Electron Positron Collider
- eRHIC electron Relativistic Heavy Ion Collider

ILC 製作技術に関連する機器・装置例の概要を以下に示す。

なお、産業用加速器が研究用加速器からの技術移転により普及及び発展するとの観点から初めに研究用をその後に産業用について記載する。

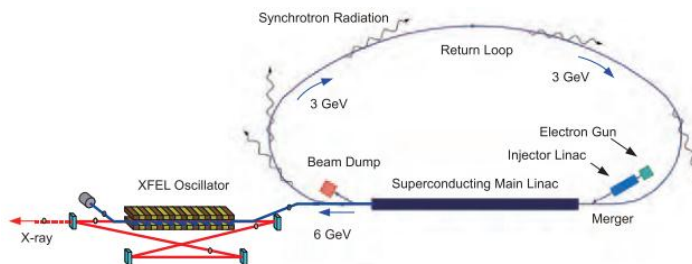
【研究用加速器】

①次世代放射光自由電子レーザー施設

(1)ERL : Energy Recovery Linac[4]

2010	2020	2030	2040	2050

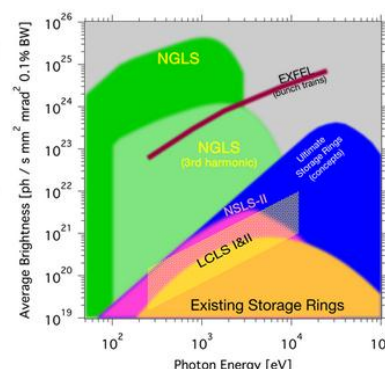
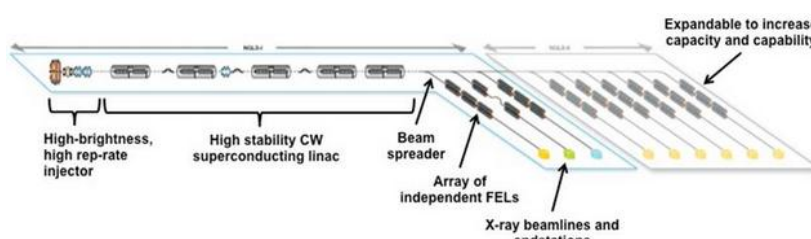
物質のより精密な構造解析や生命活動のより速い反応を非破壊で観測可能な超伝導線形加速器を用いた ERL 光源（輝度 10^{23} 、または 100 フェムト秒の短パルス幅の X 線）が、次世代放射光光源の一つとして計画されている。X 線は、学術利用と共に多くの産業利用が見込まれる。



(2)NGLS : Next Generation Light Source

2010	2020	2030	2040	2050
★CD-0,BESAC report 後将来計画再検討				

LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)で提案されて設計書 CD-0 まで完了した平均輝度が高く、ビームラインが容易に増設できるように設計された FEL 光源である。超伝導ライナックは ILC と同じ 1.3GHz TESLA-like 超伝導空洞技術を用いて CW 運転される計画となっている。

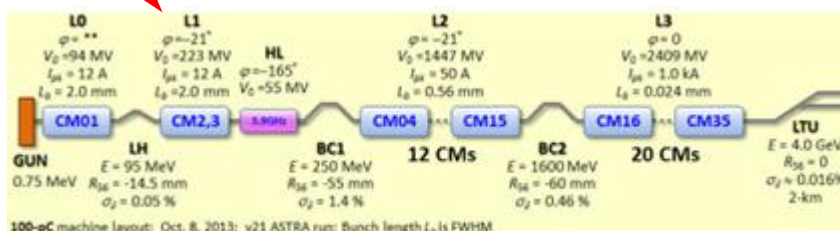
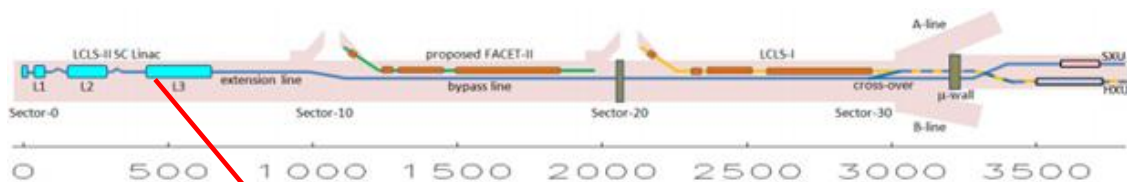


②既存常伝導ライナックへの超伝導ライナック増設によるアップグレード

(1)LCLS II [13]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

これまで LCLS で軟 X 線による研究が多く実施されてきた経緯から、LCLS II は軟 X 線領域での共用のため、既存の LCLS の上流に電子銃と加速器機器を新たに設置し軟 X 線用のアンジュレータなどを整備し施設を拡張する計画。



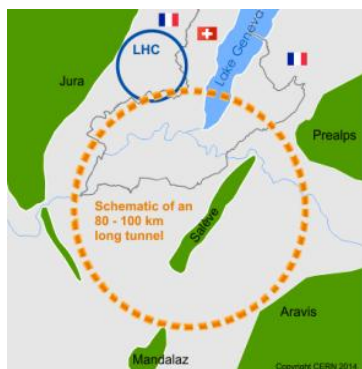
③超大型円形衝突型加速器（素粒子実験用加速器）

(1)FCC : Future Circular Collider[16]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

CERNがLHC(Large Hadron Collider)の後継機として5年間にわたる検討を開始した周長80km~100kmの大型円形衝突型超伝導加速器で、研究対象は「超対称性理論」や暗黒物質(ダークマター)の解析など。

用いられる超伝導加速空洞の加速周波数は200MHz~800MHzから選択される。[40]



FCC の陽子、電子陽電子シナリオ

parameter \ senario	pp	e±
Beam Energy	100TeV	175GeV
RF Frequency	—	400MHz
# of cavities	—	568
# of cells/cavity	—	5
Eacc	—	10.5MV/m
# of cryomodules	—	71

(2)CEPC : Circular Electron Positron Collider,SppC : Super pp Collider[17]

2010	2020	2030	2040	2050

中国で提案されている周長 50km~70km の大型円形衝突型超伝導加速器計画で FCC と同様に陽子-陽子と電子-陽電子のシナリオがある。

超伝導空洞は、現在、開発が進んでいる ADS(加速器駆動核変換システム)を活用する。[40]

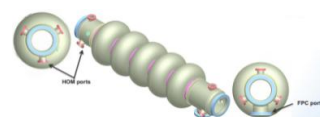


SppC-陽子-陽子、CEPC-電子-陽電子シナリオ

parameter \ senario	pp	e [±]
Beam Energy	25TeV-45TeV	120GeV
RF Frequency	—	650MHz
# of cavities	—	384
# of cells/cavity	—	5
Eacc	—	15.5MV/m

FCC 及び CEPC において空洞選択オプション

として BNL3 の 704MHz、JLAB の 750MHz の超伝導空洞の採用も検討されており、設計、製造、検査、試験の各技術は ILC で開発されている基幹技術が基になっている。



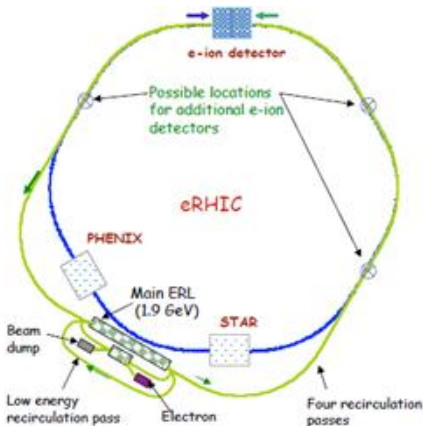
BNL3 704MHz5-cell SRF cavity

④電子-重イオン衝突型加速器

(1)eRHIC : electron Relativistic Heavy Ion Collider[20]

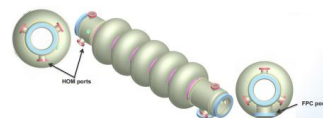
2010	2020	2030	2040	2050

米国ブルックヘブン研究所で計画されている電子・重イオン衝突型加速器 RHIC の後継機となる超伝導加速器施設。電子と高エネルギー重イオンの衝突実験・物理研究に用いられる。



Parameter	p(A)	e
Energy,GeV	325(125)	20
Number of bunches	166	
Bunch intensity(u),10 ¹¹	2.0(3)	0.24
Bunch Charge,nC	32	4
Beam current, mA	420	50
Normalized emittance,μm, 95% for hadrons/rms for e	1.2	25
Polarization,%	70	80
rms bunch length,cm	4.9	0.2
β ,cm	25	25
Luminosity,x10 ³³ cm-2s ⁻¹	2.8	

使用される超伝導空洞の設計、製造、検査、試験の各技術は ILC の技術が基になっている。



BNL3 704MHz5-cell SRF cavity

【産業／学術用加速器】

① EUV 光源

(1) 半導体製造用露光装置光源[5]

2010	2020	2030	2040	2050

半導体製造プロセスにおいて今後の微細化の鍵となるリソグラフィー光源技術である。現在のエキシマレーザー等による光源では光のパワーが低く複数回のプロセスが必要となる。そのため生産効率が悪くコストや品質に大きな影響を与えるため、超伝導リニアックを用いた自由電子レーザー等の新しい光源が期待されている。

米国 IARC (Illinois Accelerator Research Center) において研究所、大学及び企業により ILC の技術を基にした光源の共同開発が計画されている。

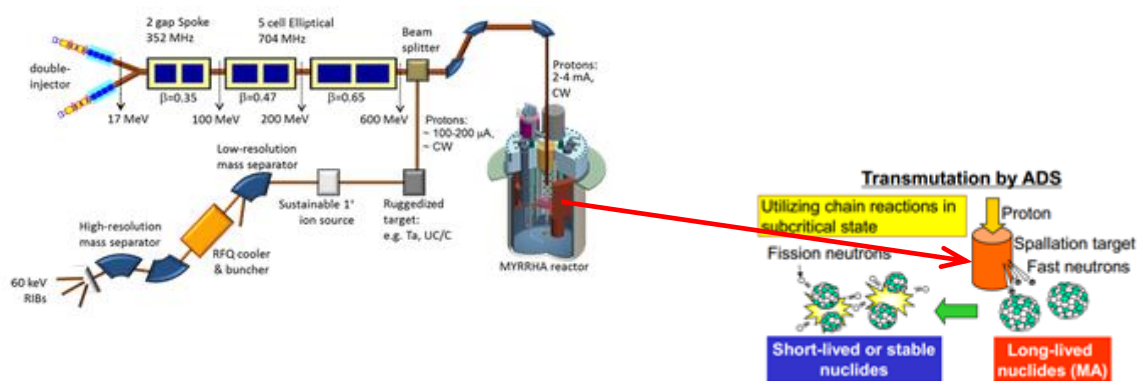


② 核変換施設

(1) ADS : Accelerator Driven System[6][7]

2010	2020	2030	2040	2050
		実証施設	初号機	建設

高レベル放射性廃棄物に含まれる元素を、半減期や利用目的に応じて分離し、その内の長寿命核種であるマイナーアクチノイドについて、大電流の超伝導陽子加速器を用いた中性子源と未臨界炉を組み合わせる発電しながら短寿命化する施設。この技術を用いることにより、高レベル放射性廃棄物の長期にわたる潜在的な有害度を大幅に低減するとともに地層処分施設の規模を縮小できると見込まれ、廃棄物処分の負担軽減に繋がると期待される。

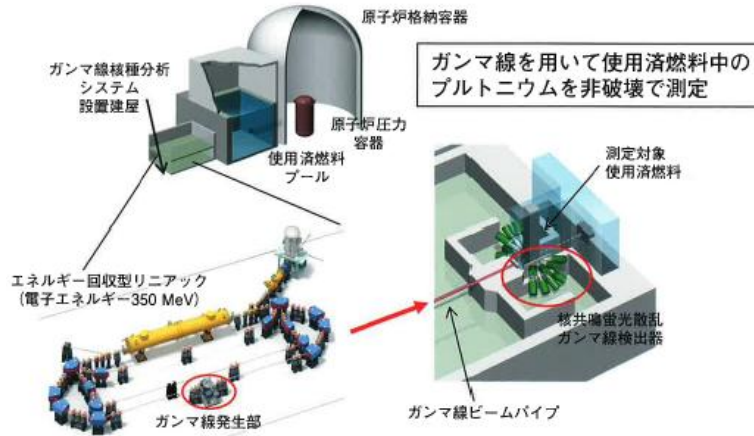


③核セキュリティ

(1)レーザーコンプトン γ 線発生装置[8]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

原子核に直接 γ 線を照射し、原子核に特有な準位を励起することで放出される γ 線を観測することで各種の識別を行う核共鳴蛍光散乱を活用した原子炉使用済核燃料中のプルトニウム非破壊測定装置。

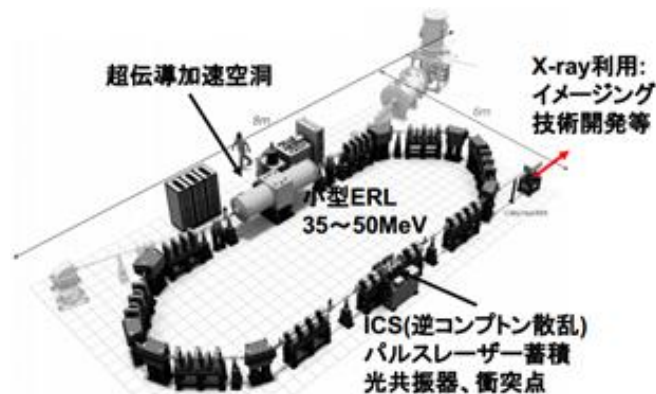


④非破壊検査装置

(1)レーザーコンプトン γ 線発生装置[9]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

ERL(Energy Recovery Linac)を用いた超伝導加速器で発生した電子ビームとレーザーとの衝突によって、高エネルギー・高輝度 X 線を用いて非破壊検査を行うことができる装置。



高強度小型 X 線源
数 keV から 100keV X 線領域エネルギー可変光源

⑤先端デバイス構造解析装置

(1)スピン偏極走査型トンネル顕微鏡[14]

2010	2020	2030	2040	2050
→電子銃の高輝度・高偏極化による性能向上				

スピン偏極した光ビームを資料に照射し磁性材料薄膜をコーティングした探針を磁性資料表面上を走査しながら探針-試料間に流れるスピン依存したトンネル電流を検出することで磁場を計測する装置。



Spintronics Cluster Tool

System solutions for magnetic multilayers and analysis

⑥先端材料解析装置

(1)偏極低エネルギー電子顕微鏡[15]

2010	2020	2030	2040	2050
→電子銃の高輝度・高偏極化による性能向上				

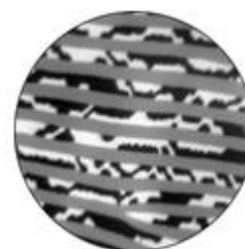
レーザー照射によって発生した偏極電子ビームを用いて物質表面の現象を実時間で観察することができる装置。

例として、高速 MRAM 開発に非常に重要な材料の磁性特性の詳細情報をナノオーダーの磁区特性として得ることができる。



Direct surface imaging microscope

Highest resolution < 8nm
In-situ crystal growth observation
Wide sample temperature range ~100K to 1800K



Imaging example

120nm thick MnAs film on GaAs

⑦Lab 用放射光装置

(1)小型放射光装置[18][19]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

小型の放射光装置で、今まで大型施設を利用していた産官学の研究者が Lab で分析、検査等測定が可能となり、X線利用の利便性が格段と進展する。現在、KEKの1.3GHz小型超伝導加速器は、ILC実証機STFを基に開発が進められている。



1.3GHz 小型超伝導加速器@KEK



小型超伝導加速器@NIOWAVE

Application	Beam Energy	Beam Current	Beam Power
Medical Radioisotopes	40MeV	2.5mA	100kW
Commercial FEL & X-ray and Neutron Sources	2-40MeV	2.5mA	5-100kW
Energy Recovery Linac for High Power FEL & X-ray and Neutron Sources	2-40MeV	25mA	50-1,000kW

⑧小型多用途超伝導電子加速器

(1)RI 製造装置[23][24]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

医療用 RI(放射性同位体元素)は輸送時間に制約があることや、現在、海外の原子炉で生産されているが老朽化により安定供給に課題がある。小型な装置で有れば必要な所で必要量を生産することができる。用いられる Spoke 空洞の製造に ILC の技術が活用される。



Our superconducting electron accelerator is used to photofission uranium (low enrichment), or knock out a proton or neutron from stable isotopes to produce various radioisotopes. In addition to Mo-99, Niowave is pursuing other medical isotopes like Cu-67 and Ac-225, and industrial radioisotopes such as Mn-54 and Zn-65.

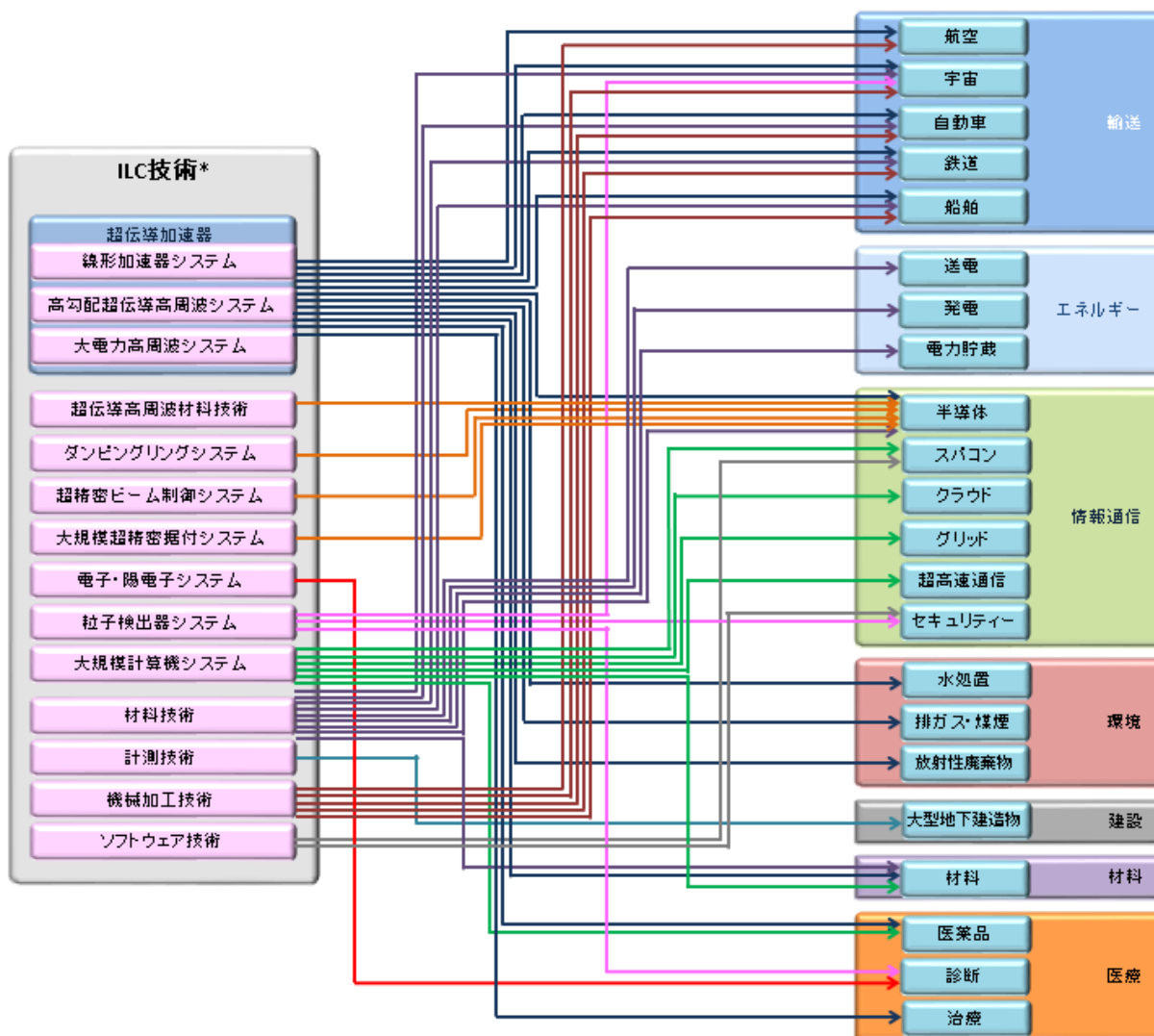
Niowave is pioneering the use of compact, 4 Kelvin (-452°F) superconducting linacs capable of meeting this pressing national need. Our proprietary superconducting electron linac system is easily reconfigured to operate at energy between 20 MeV and 40 MeV, with power levels ranging from 50 to 100 kW to produce a variety of radioisotopes. A compact superconducting accelerator used for radioisotope productions is shown being installed for commissioning at Niowave's test facility

Application	Beam Energy	Beam Current	Beam Power
Medical Radioisotopes	40MeV	2.5mA	100kW
Commercial FEL & X-ray and Neutron Sources	2-40MeV	2.5mA	5-100kW
Energy Recovery Linac for High Power FEL & X-ray and Neutron Sources	2-40MeV	25mA	50-1,000kW

(2) ILC 技術と産業の相関

ILC 技術と産業の相関を図 2-1 に示す。ILC の技術波及が様々な産業に及んでいること、一方、ILC の複数の技術が一つの産業に影響を及ぼしていることが分かる。

図表 I - 34 ILC 技術と産業の相関



(3) 産業向け加速器の想定される用途と方向性

医療を含む産業用加速器としての用途を整理する。参考文献[1]、[2]などを基にまとめたものを下図表に示す。

図表 I - 35 産業用加速器の用途

利用先	用途		対象例	加速器・機器
医療	診る 治す 作る 処理	診断 解析 治療 製造 滅菌・殺菌	腫瘍、血管、脳神経 創薬 悪性腫瘍 RI 医療廃棄物	CT、PET、MRI、γカメラ 放射光施設 放射線治療装置 加速器型 RI 製造装置 電子線照射装置
製造	加工	切断・穿孔 溶接 溶解 微細加工	金属・非金属加工 加工部品組立 金属材料精製 半導体製造	電子線加工機 電子線溶接機 電子線溶解炉 電子線描画装置 EUV リソグラフィー
	処理	印刷 改質	包装紙他印刷物 硬化・耐熱・耐薬品	電子線印刷装置 電子線照射装置 イオン注入装置
	見る	解析	先端材料開発	放射光施設 電子顕微鏡
		検査	非破壊検査	LCS X 線発生装置
環境	処理	改質 浄化	放射性廃棄物半減期短縮 発電所煤煙、汚水、スラッジ	加速器核変換システム 電子線照射装置
エネルギー	作る	発電	電力	加速器駆動未臨界炉
	見る	識別	原子炉使用済核燃料管理	LCS γ 線発生装置
食品	作る 処理	品種改良 殺菌・殺虫・発芽防止	農産物 食品・農畜産物	γ 線・電子線照射装置 γ 線・電子線照射装置

医療を含む産業用加速器として求められる方向性を整理した結果を以下に示す。また、Fermilab の報告[34]にある将来加速器の応用機会について下図表に示す。

図表 I - 36 次世代の産業用加速器の方向性

利用先	用途		加速器・機器	方向性
医療	診る 治す 作る 処理	診断 解析 治療 製造 滅菌・殺菌	CT、PET、MRI、 γ カメラ 放射光施設 放射線治療装置 加速器型 RI 製造装置 電子線照射装置	小型、高分解能 小型、高輝度 小型 小型
製造	加工 処理 見る	切断・穿孔 溶接 溶解 微細加工 印刷 改質 解析 検査	電子線加工機 電子線溶接機 電子線溶解炉 電子線描画装置 EUV リソグラフィ 電子線印刷装置 電子線照射装置 イオン注入装置 放射光施設 電子顕微鏡 LCS X 線発生装置	小型、高出力 小型、高出力 高精度 高出力 小型、高出力 大型径対応スループット 小型、高輝度 高分解能、高輝度 小型、高分解能
環境	処理	改質 浄化	加速器核変換システム 電子線照射装置	高信頼性
エネルギー	作る 見る	発電 原子炉使用済核燃料管理	加速器駆動未臨界炉 LCS γ 線発生装置	高信頼性 小型、高精度
食品	作る 処理	品種改良 殺菌・殺虫・発芽防止	γ 線・電子線照射装置 γ 線・電子線照射装置	小型 小型

図表 I - 37 Future Accelerator Applications – Many Opportunities!

Sector	Opportunities
Energy and Environment	Flue gas treatment Gas to liquids conversion and flare gas recovery Upgrade of heavy oils Superconducting wind generators Accelerator driven power plants, Nuclear waste destruction Waste Water and sludge treatment
Industrial	Next generation semiconductor fabrication Food preservation and safety Improved welding and fabrication(3D metal printing) Improved Highway construction Material transformation/processing Industrial isotopes as wear indicators, etc
Medical	Accelerator-driven medical isotope production Particle beam cancer therapy
Safeguards and Security	Non-invasive and stand-off inspection

(4) 次世代の産業向け加速器実現の見通し

医療を含む産業用加速器の実現見通しを整理し下図表に示す。

図表 I - 38 次世代の産業用加速器の実現見通し

利用先	対象例	加速器・機器	実現見通し					
			2010	2020	2030	2040	2050	
医療	腫瘍、血管、脳神経	CT、PET、MRI、 γ カメラ	・ILCの検出器及びソフトウェア技術を活用し高分解能高スループットの診断装置として発展すると考えられる。					
	創薬	放射光施設						
	悪性腫瘍	放射線治療装置	・常伝導リナック、シンクロトロン、サイクロトロンが主流。2014年に超伝導サイクロトロンが流通し始めた。					
	RI	加速器型RI製造装置						
	医療廃棄物	電子線照射装置	・ロードトロンが主流、現在は滅菌・殺菌に使用されている。					
製造	金属・非金属加工	電子線加工機	}	一部の製造分野では3Dプリンターと組み合わせて積層成形技術として発展普及すると考えられる。				
	加工部品組立	電子線溶接機						
	金属材料精製	電子線溶解炉						
	半導体製造	電子線描画装置	・リソグラフィーの微細化に応じたマスク描画技術開発: 高速・高精度・超精密制御・テラ級情報処理技術					
		EUVリソグラフィー						
	包装紙他印刷物	電子線印刷装置	・静電加速器が主流					
	硬化・耐熱・耐薬品	電子線照射装置	・静電加速器が主流					
		イオン注入装置	・静電加速器が主流					
	先端材料開発	放射光施設						
		電子顕微鏡						
LCS X線発生装置								
環境	放射性廃棄物半減期短縮	加速器核変換システム*						
	発電所煤煙、汚水、スラッジ	電子線照射装置	・静電加速器が主流					
エネルギー	発電	加速器駆動未臨界炉*						
	原子炉使用済核燃料管理	LCD γ 線発生装置						
食品	農産物	γ 線・電子線照射装置	・ロードトロンが主流					
	食品・農畜産物	γ 線・電子線照射装置	・ロードトロンが主流					

■以外の加速器は既存装置の高性能化や小型化であり、ILCの技術を活用して継続した開発が進められると考えられる。

6) ILC 実現がもたらす新しい加速器関連機器（検出器）の方向

(1) ILC 実現がもたらす新しい検出装置・機器の見通し

ILC の実現によって、加速器以外の関連した機器・装置、とりわけ電子・陽電子の衝突反応を観測するための検出器に由来する新しい機器・装置の実現見通しについて、ILC 実現技術に関連する機器・装置の例とともに下表に概要を示す。

図表 I - 39 新しい加速器関連機器・装置の実現見通し概要(■ 研究用、■ 産業用)

技術								ILC製作技術に関連する機器・装置の例と実現見通し			
信号処理ソフトウェア技術	高安定基準信号発生技術	高安定基準信号伝送技術	計測技術	半導体デバイス技術	検出データ読み出し技術	大容量データ伝送技術	加工技術	検査技術			
									○:技術的関連性に該当するもの		
1	○			○	○		○		火山監視装置、原子炉の透視 (小型Muon検出装置)		?2020年頃
2	○		○	○	○				Mu2e、COMET (ミューオン電子転換過程探索装置)		2010年代終わり、2016年～
3	○	○	○	○	○	○			JEM EUSO、CTA (宇宙線観測装置)		2017年打上予定、2020年～
1	○		○	○	○				TOF-PET内視鏡治療装置、γカメラ (小型γ線検出装置)		?2010年代末～2020年頃
2	○		○	○	○				高分解能PET、高分解能γカメラ (高分解能γ線検出装置)		?2010年代末頃
3	○		○	○	○				高分解能陽子CT (高分解能陽子検出器)		?2010年代末頃
4	○		○	○	○				高感度PET (高感度γ線検出装置)		?2010年代末頃
5	○		○	○	○				コンテナ検査装置、橋梁検査装置 (大型X線/中性子線検出装置)		?2020年頃

TOF Time of Flight
 COMET Coherent Muon to Electron Transition
 CTA Cherenkov Telescope Array
 PET Positron Emission Tomography
 CT Computer Tomography
 JEM EUSO Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module

次頁以降に ILC の実現技術に関連する機器・装置例の概要を研究用、産業用の順に示す。

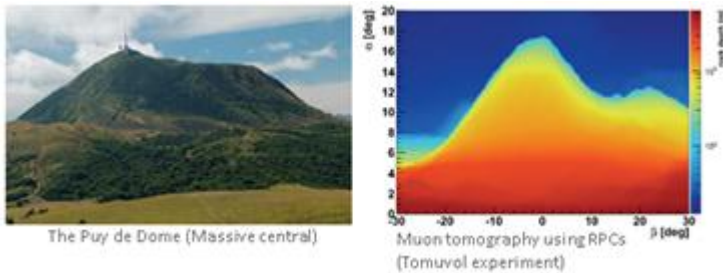
【研究用加速器関連機器・装置】

①小型 Muon 検出装置

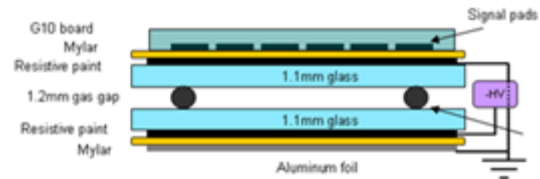
(1)火山監視装置[25]

2010	2020	2030	2040	2050

地球に絶え間なく降り注ぐ宇宙線ミュオンを用いて、高エネルギーミュオンが X 線など他の粒子では透過不可能な km オーダーの岩石などを透過できる性質を利用し火山体のイメージングを行う技術。



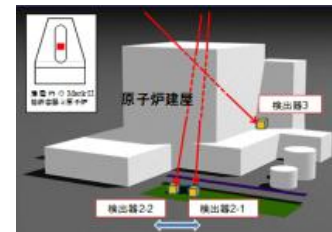
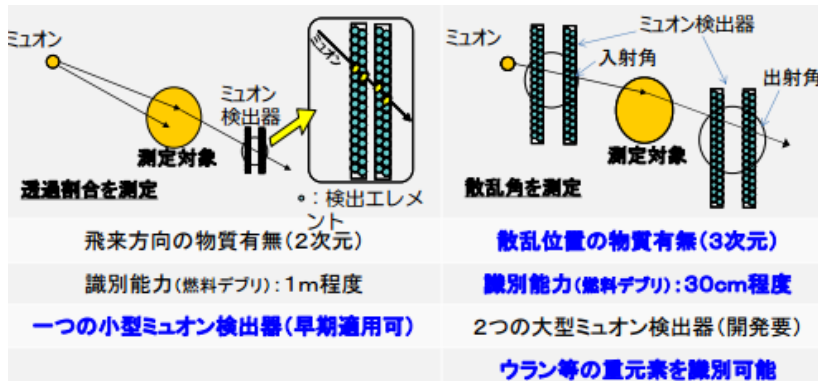
Similar measurements planned at Stromboli and Vesuvius (Mu-Ray Project) using scintillator tiles and Silicon Geiger-mode Photo-Multipliers



(2)原子炉透視装置[46,47]

2010	2020	2030	2040	2050

原子力発電所の廃炉作業に向けて、压力容器内燃料や压力容器及び格納容器の燃料デブリの位置や量の把握が重要である。現在、宇宙線ミュオンを用いた検出装置の検出実証試験が行われており、2015年3月時点で観測範囲にデブリが存在しない可能性が示唆されている。2020年の燃料取出しに向け、測定分解能向上や測定範囲を地下方向に拡大するための開発が急がれる。



東海第二発電所での測定位置

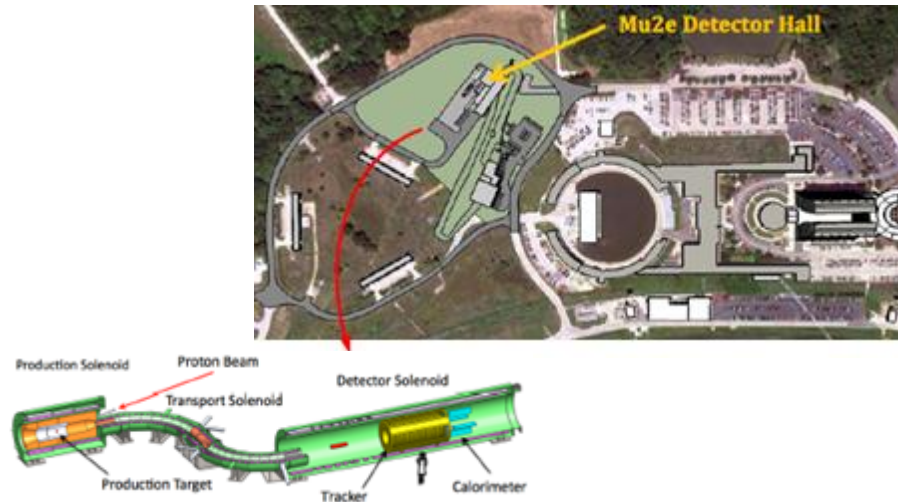
透過法(左)と散乱法(右)

②ミューオン電子転換過程探索装置

(1)Mu2e[12]

2010	2020	2030	2040	2050

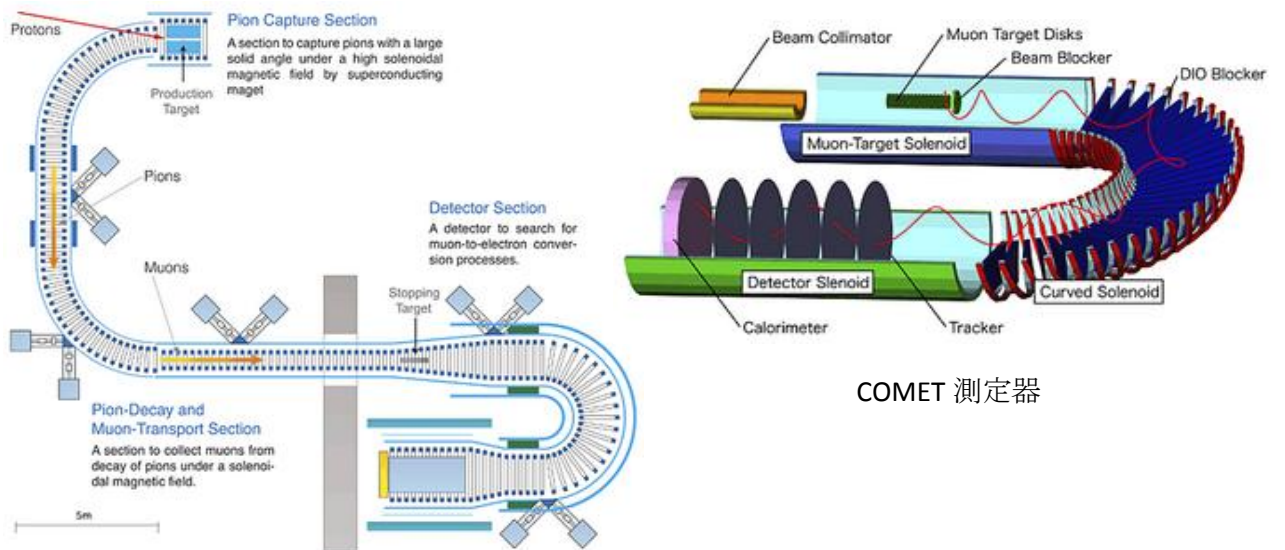
新しい物理現象のヒントを得るために、ある種の荷電レプトンが別種の荷電レプトンに変換する過程を観測するための装置。この装置ではミューオンから電子への変換過程を観測する。



(2)COMET : Coherent Muon to Electron Transition[48]

2010	2020	2030	2040	2050

素粒子標準理論を超える新しい物理現象のヒントを得るために稀な崩壊過程を探索する実験が進められており、現在の実験精度上限値を約 10,000 倍以上上回る 3×10^{-17} という 1 事象発見精度で μe 転換過程を探索するものである。2016 年実験開始を目指す。



COMET 測定器

COMET 全体図

③宇宙線観測装置

(1)JEM EUSO : Extreme Univers Space Observatory onboard Japanese Module[25]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

国際宇宙ステーションに取り付けられた広視野角を持つ望遠鏡を用いて、極限エネルギー宇宙線が大気原子核と衝突することによって生じる空気シャワーからの蛍光やチェレンコフ光を捉える望遠鏡装置。ILCのHARDROCと呼ばれるハードウェア技術が用いられる。

JEM EUSO experiment

Analog Front End similar to HARDROC

64 channels

Photoelectron counting (<50MHz)

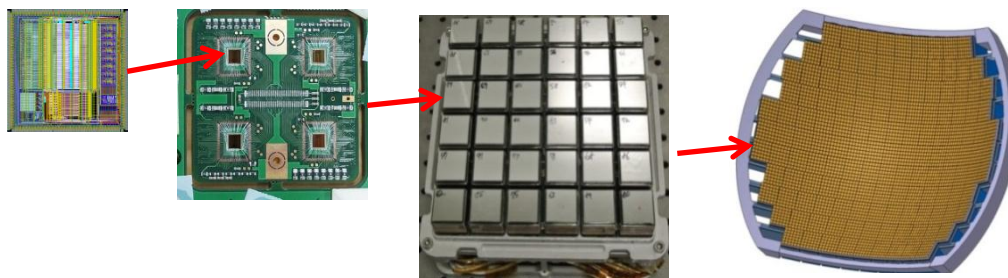
Time Over Threshold (collab.JAXA/Riken/Konan University)

Digital part :Digitization,memorization

Power consumption < 1 mW/ch

data flow ~ 384 bits / 2.5 us

Radiation tolerance : triple voting



(2)CTA : Cherenkov Telescope Array[49]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

CTA計画は、2017年頃の部分観測開始、2020年のフル観測開始を目指して100台近くの大気チェレンコフ望遠鏡を3-10 km²に敷き詰め大規模なTeVガンマ線天文台を南半球と北半球に建設するものである。観測機器の較正に、現地に直接設置・コンパクト電子加速器を活用。



No	研究対象
1	銀河宇宙線の起源・加速・伝搬
2	銀河内高エネルギー天体の観測
3	銀河系外からの高エネルギー宇宙線の起源・加速・伝搬
4	銀河系外高エネルギー天体の観測
5	活動銀河、ガンマ線バーストからの宇宙論研究
6	銀河中心、矮小銀河からの暗黒物質対消滅、崩壊ガンマ線の探索
7	プランクスケールでのローレンツ普遍性のテスト

CTA計画の望遠鏡配置

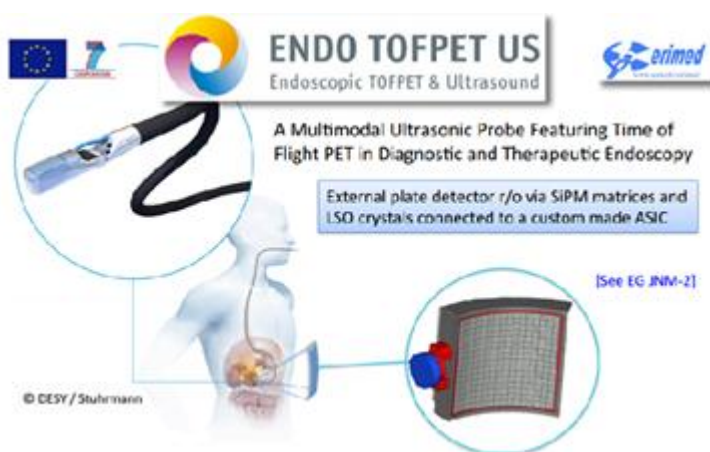
【産業用加速器関連機器・装置】

①小型 γ 線検出装置

(1)TOF-PET 内視鏡治療装置[26]

2010	2020	2030	2040	2050

超音波プローブと検出器と組み合わせて擬似3次元画像を構成できる内視鏡治療装置。



(2)ミニチュア γ カメラ[25]

2010	2020	2030	2040	2050

乳がん手術の際に現場で使用できる小型の γ カメラ。企業に技術移転された例。

Medical applications (IMNC) :

TRECAM(Tumor Resection
CAMera) : miniaturized gamma-
Camera for breast cancer surgery
Industrial transfer



256 channels flat
Panel MC-PMT
4x64 channels
HARDROC2

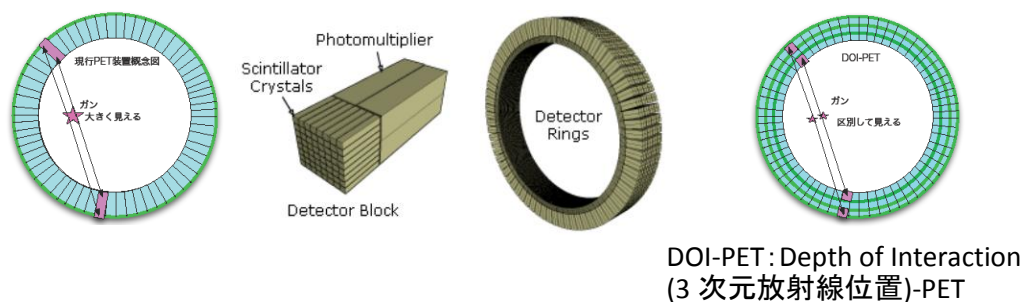


②高分解能 γ 線検出装置

(1)高分解能 PET[27][28][29]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

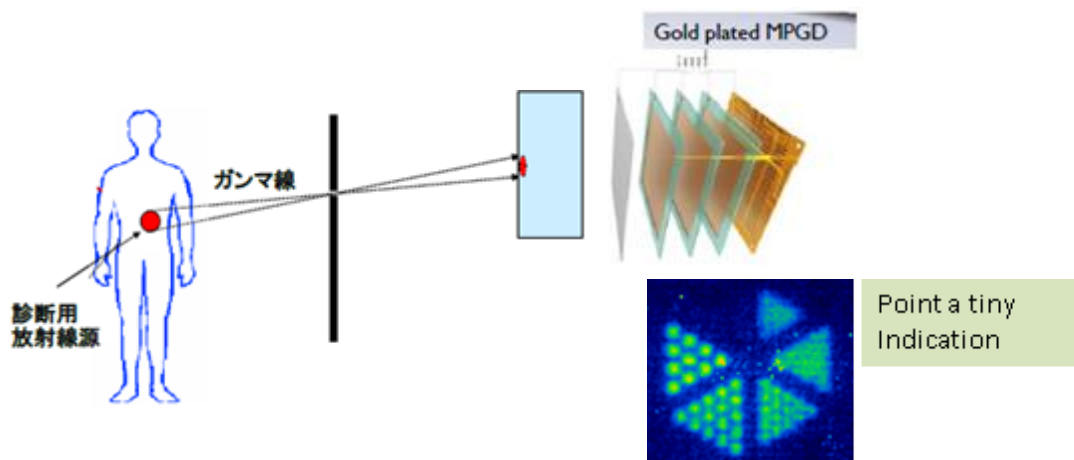
半導体検出器を利用することで、これまでの光電子増倍管では困難である検出器の積層構造により、より小さな病巣を正確に識別することができる PET。



(2)高分解能 γ カメラ[30]

2010	2020	2030	2040	2050
------	------	------	------	------

中央飛跡検出器の微細構造を持つガス増幅デバイスを利用することで高分解能の γ 線検出装置としてよりより精度良く画像診断することができる装置。



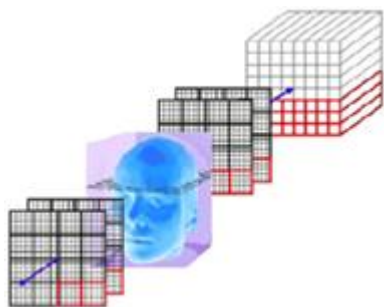
③高分解能陽子検出装置

(1)高分解能陽子 CT[26][31]

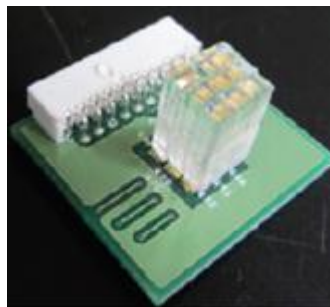
2010	2020	2030	2040	2050

カロリメータの検出器を陽子 CT と陽子治療装置の線量モニターに応用した装置。検出デバイスが小型のため同じスペースであれば高分解能化が可能。また、同じ分解能であれば、小型化が可能。

The power of imaging calorimeters can also be applied for proton detection in proton CT and for beam and therapy monitoring in proton therapy



V. Rykalin (NIU), "Development of a proton CT scanner", TIPP 2011. [See N14-189](#)



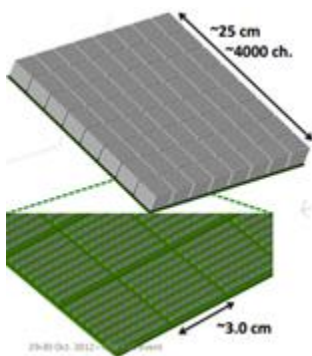
unprecedented granularity and compactness Offered by SiPM coupled to crystals

④高感度 γ 線検出装置

(1)高感度 PET[26]

2010	2020	2030	2040	2050

カロリメータの検出器技術を活用して、検出デバイスのデッドスペースを減らすことにより感度を 50%改善した高感度 PET。



Multi-channels array of crystals + SiPM

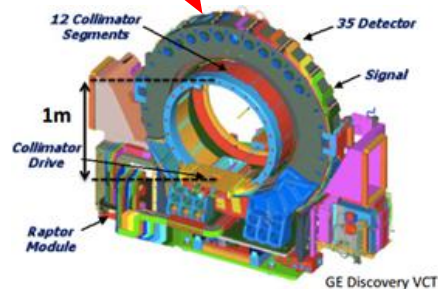
- minimum dead material between crystals
- SiPM packaging is crucial :
 - up to 50% sensitivity improvement
 - By reduction of dead space possible
 - monolithic arrays / through vias

High density of channels

- Dedicated r/o ASIC
- Currently limited to $3 \times 3 \text{ mm}^2 / \text{ch}$.

The requirements of the applied (medical) market are substantially Driving SiPM development

→ Important to keep both community interests in view



⑤大型 X 線/中性子検出装置

(1)コンテナ検査装置[30]

2010		2020		2030		2040		2050	

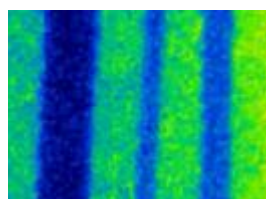
港湾などの税関で核物質や武器などの危険物の有無を効率的に外部から非破壊で検査する装置。水際で国内に危険物の持ち込みを阻止するための技術の一つとして重要と考えられる。



(2)建造物検査装置[30]

2010		2020		2030		2040		2050	

橋梁や建造物の検査を非破壊で行い、コンクリートのひび割れや鉄筋の腐食による痩せなどを観測する装置。今後、国内でも橋梁やトンネルの老朽化が進むと予想され効率的な検査方法として考えられている。



Inspection of
Bridge/building

7) ILC 製作における量産化技術の工業的応用

ILC で用いられる超伝導加速空洞や高周波源などの部品を大量に生産するための技術が、他の工業生産品において応用可能であるかについて調査・分析を行う。

(1) ILC 製作における量産台数の概要

ILC 製作に想定されている機器の量産台数を、TDR (VOLUME 3- II : ACCELERATOR BASELINE DESIGN) [3]から、比較的台数の多い機器を対象に抜粋すると、下図表のとおりである (ILC は山岳設置、500GeV の条件)。

図表 I - 40 ILC 機器の量産台数規模概要(TDR から抜粋)

No.TDR	Systems/Items	Type	QTY	Summary	Remarks
3	Main Linac and SCRF Technology				
3.1.2	Linac Layout				
	Main Linac Unit	TypeA+TypeB+TypeA	285	TypeA:9cavities, TypeB:8cavities +1SC quadpack	Table3.1 (注)
	Cryomodule	TypeA	570	Electron Linac	
	9cell cavities	TypeB	285	Electron Linac	
	SC quadrupole package		9×570+8×285=	7,410 Electron Linac	
3.5.3	Helium inventory	modules	285	Electron Linac	Table3.13
			189	Cryogenic unit	
			1,825	Main Linacs	
3.8.2	Linac layout and cryogenic seg	RF stations	190	Electron Linac	
			188	Positron Linac	
3.8.4	LLRF control for DKS	Central LLRF controller	190	Electron Linac	Figure3.43
		Front-end controller	188	Positron Linac	
			570	Electron Linac	
			564	Positron Linac	
4	Electron source				
4.5.1	Table of parts count				
	Magnets	Quads(NC)	158		Table4.3
	Instrumentation	BPM	100		
6	Damping rings				
6.7.2	conventional Magnetes	Dipoles-Corrector	304		Table6.8
		Dipoles-Arc	150		
		Quadrupoles-Arc	482		
		Quadrupoles-Straight	121		
		Skew Quads-Corrector	158		
		Sextupoles	600		
7	Ring to Main Linac(RTML)				
7.5.1	Magnets,Pulsed elements				
	Magnets	Bends	356	Electron side	
			356	Positron side	
		Quads	825	Electron side	
			793	Positron side	
		Dipoles	1,229	Electron side	
			1,157	Positron side	
	Instruments	BPM	782	Electron side	
			752	Positron side	
	RF	cavities	440		
8	Beam Delivery System and Machi				
8.1	Accelerator Components				
	Magnets	Warmdipoles	190		Table8.3
		Warm quads	204		
	Instruments	BPM C-band	262		
		BPM stripline/button	120		
		Loss monitor	110		
	Vacuum	Pumps	3,150		

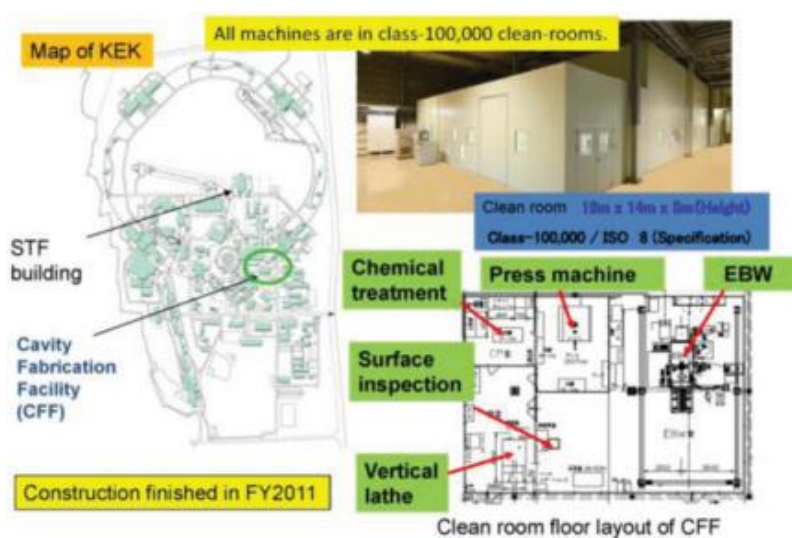
(注) 9 空洞の Cryomodule TypeA×2 と 8 空洞の Cryomodule TypeB×1 で構成される。
ここでは電子ライナック分を示している。

(2) 超伝導加速空洞の製造の実態

前記の生産台数の概要から、9cell cavity(超伝導空洞)の台数が他の機器の台数と比較して遥かに多い。したがって、以下では超伝導空洞について量産化技術の工業的応用を検討する。

①製造施設(CFF : Cavity Fabrication Facility)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) における超伝導空洞の製造施設概要を示す。



②製造設備[35][36]

KEK 内 CFF の超伝導空洞製造設備を示す。

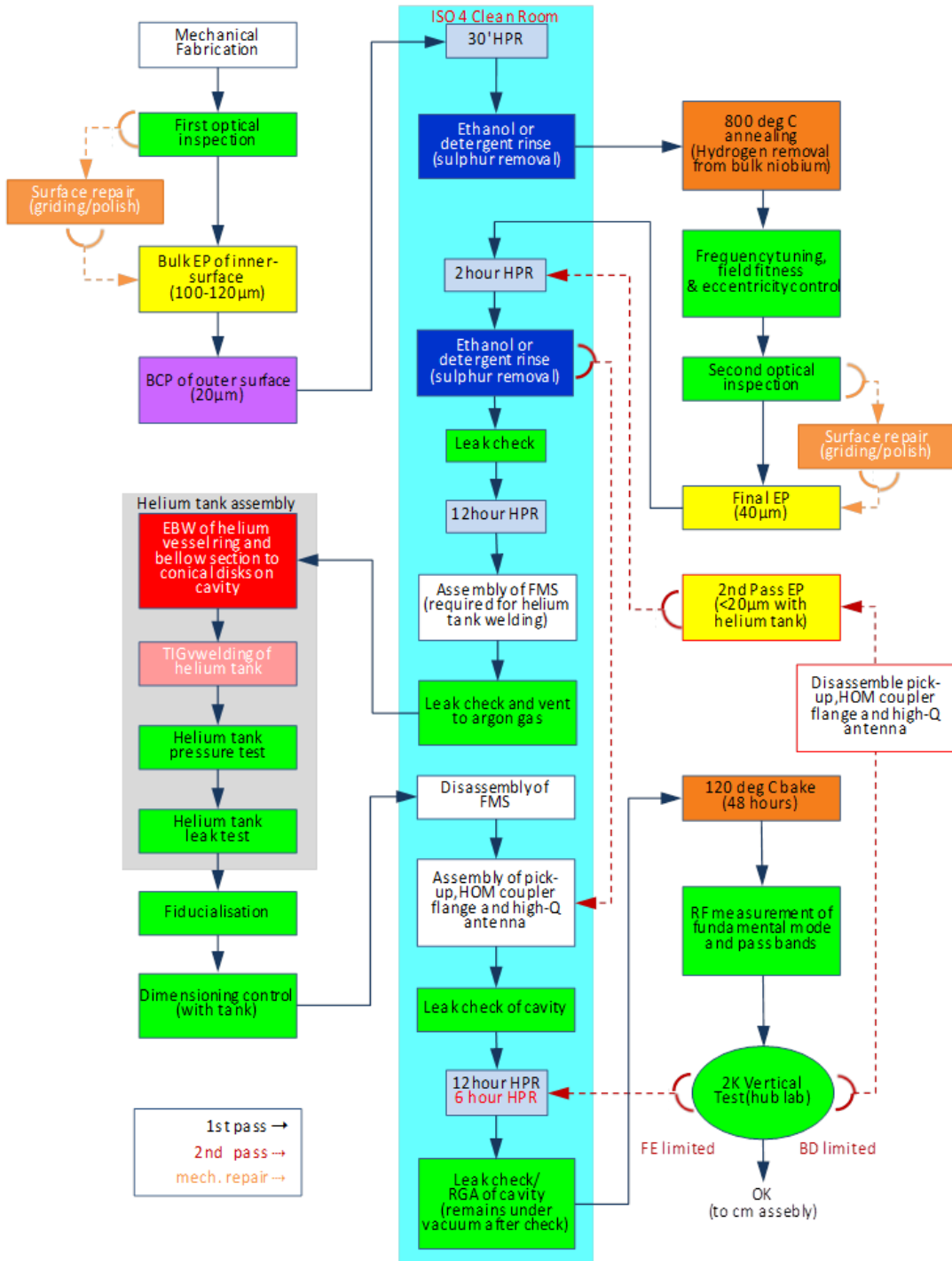
図表 I - 41 KEK 空洞製造施設内の製造設備



③超伝導空洞製造フローチャート[38]

超伝導空洞を製造する際のフローチャートを示す。

図表 I - 42 超伝導空洞製造フローチャート



④超伝導空洞用 Nb シートの検査方法[39]

超伝導空洞製作に用いるニオブシート材料の検査方法を示す。

図表 I - 43 ニオブシートの検査方法[39]

Method	Principle of the method	Penetration depth	Resolution	Destructive or non-destructive	Test time for a sheet measuring 265 × 265 × 2.8 mm	Remarks
X-Ray radiography	Difference in X-ray absorption between defect and Nb	Complete	Depends on the size of component (10 μm – 1 mm)	Can be nondestructive	About 30 min	The 'shadow picture' depends on the difference in density and atom number
Neutron radiography	Difference in neutron absorption between defects and Nb	Complete	Depends on the size of component (10 μm – 1 mm)	Can be nondestructive	About 60 min	The 'shadow picture' depends on the special quality of isotopes, and good detection of light elements
Ultrasonic scanning	Reflection of sound waves at interface	Complete (needs a coupling)	Up to 50 μm	Non-destructive	About 30 min	Non-homogeneity in metals is difficult to detect
Eddy current scanning	Electromagnetic induction	Depends on frequency (from micrometres to millimetres)	Up to 100 μm	Non-destructive	About 30 min	
SQUID scanning	The Josephson effect	Complete	Up to 30 μm	Non-destructive	About 30 min	SQUID scanning devices are not available on the industrial level
Neutron activation analysis	Irradiation with thermal neutrons, measurement of γ-spectrum	Complete	Detection of clusters with sizes up to 100 μm	Non-destructive	About 15 h	Efficient for tantalum inclusions, some parts per million of Ta in Nb can be detected
Synchrotron fluorescence analysis(SYRFA)	Excitation by white beam (analysis of fluorescence energy spectrum)	1 μm – 100 μm	Up to 1 μm	Can be done nondestructively	Some hours for inspection of a 20 × 20 mm area	K-lines (energy about 0–80 keV), sensitivity up to a few μg/g of impurity content
Synchrotron fluorescence analysis(XAFS)	Energy selection in the primary beam, observation of the absorption edge	About 10 μm	An area of 12 × 12mm can be tested in one step	Can be done nondestructively	5 h for inspection of a 150 × 100 mm area	L-lines (energy about 0–10 keV), sensitivity up to a few μg/g of impurity content
Microhardness testing	Intrusion of the diamond pyramid	Depends on load value	About 50 μm	Conditionally non-destructive	Residual marks of few micrometres that will be removed during subsequent cavity preparation	Sensitivity depends on the differences in hardness between Nb and inclusion

⑤超伝導空洞製造技術と表面処理レシピ[35]

超伝導空洞製造に用いる技術及び表面処理の内容を示す。

図表 I - 44 超伝導空洞製造技術及び表面処理

超伝導空洞の製作技術

No.	技術	概要
1	電子ビーム溶解	10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁵ Torr の真空中において電子線により Nb 粉体を溶解し不純物を取り除き純度を高める。
2	圧延・焼純	不純物の混入がないようにクリーンルームにおいて Nb インゴットを圧延と焼純を繰り返し、厚さ 2.8 mm の板に加工する。
3	焼純	圧延を繰り返した材料は、層状の構造が残り機械的な応力歪が蓄積されているため、720°C、2 時間、10 ⁻⁵ Torr で焼純を行う。
4	深絞り加工	厚さ 2.8 mm、直径 270 mm、中心部に 30 mm Φ の穴加工をした後深絞りによりカップに加工される。56 枚/数時間@KEK
5	トリム加工	深絞り後、カップの両端に残っている空洞製作に不要な部分を取り除く。
6	電子ビーム溶接	大気中で溶接すると溶接部に酸素等不純物が混入すると超伝導性能が低下するため、真空中で電子ビームによって溶接する。溶接終了後も部品が 100°C 以下に自然冷却するまで待つ。
7	チューニング	3 次元計測により加工寸法を測定し、必要に応じて機械的に調整する。
8	Pre-tuning	ビードプル法により各セルの π モード共振周波数を測定。測定しながら塑性変形により電場の強度を 98% までそろえる。
9	表面処理	フィールドエミッションによる暗電流増加やクエンチによる超伝導状態の破れを抑制するために空洞内面を滑らかかつ正常に保つための処理。

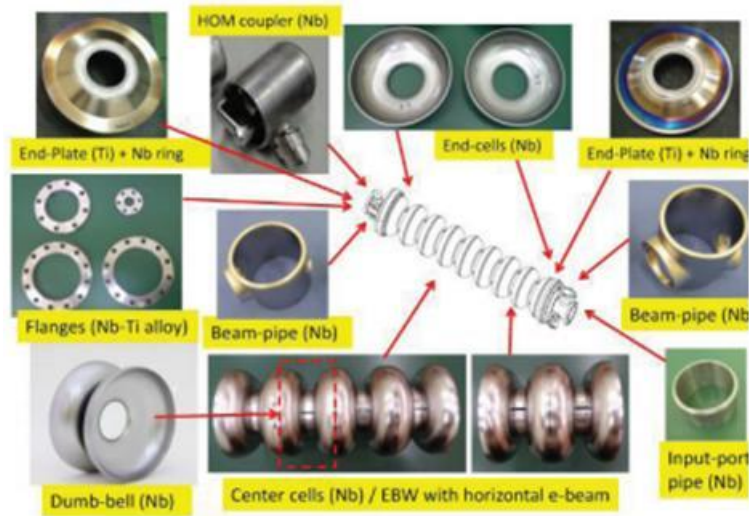
表面処理レシピ

処理名	処理内容	除去厚み(μm)	目的
遠心バレル研磨 (CBP)	水と石による機械研磨	135-235	ニオブ材料の欠損除去や、溶接部分の平坦化
化学研磨 (CP)	化学反応、エッチング	10	機械研磨の汚れ除去、EP 前にある程度スムーズな表面を準備
焼純	750°C、3 時間、真空炉において焼純	—	機械研磨などで蓄積されたストレスの開放、H ガスの脱ガス
電解研磨 (EP)	化学反応と電気反応	80	非常にスムーズな表面を作る
高圧洗浄 (HPR)	超純水 (UPW) による高圧洗浄	—	表面の異物除去、清浄化
ベーキング	120°C、45 時間、空洞内を真空排気	—	酸素の拡散

⑥9cell 超伝導空洞の構成

超伝導空洞を構成する各種部品を示す。

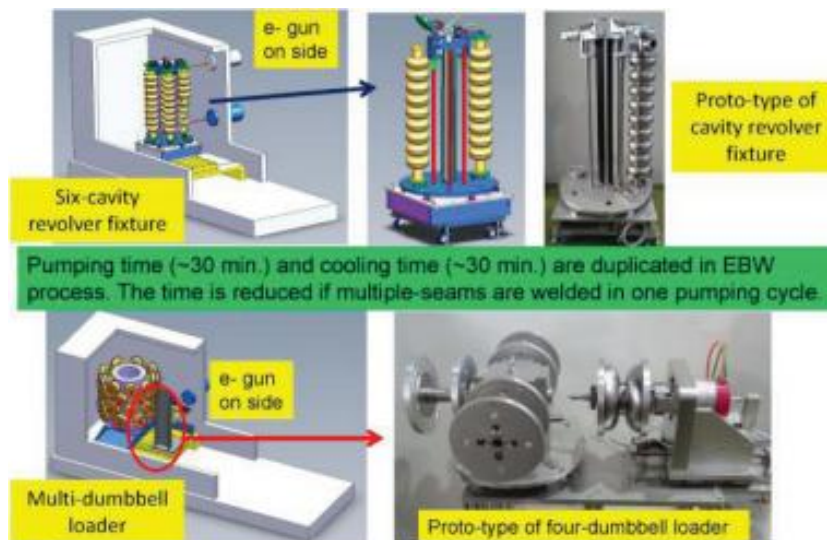
図表 I - 45 超伝導空洞の構成部品[35]



⑦超伝導空洞の量産化に対する取り組み

超伝導空洞の量産においては、その製造時間、コストの多くを溶接に要するといわれており効率良く量産製造を行うための検討がなされている。図 2-X5 に電子ビーム溶接を効率よく行うための治具開発の状況を示す。

図表 I - 46 Six-cavity resolver 及び Multi-dumbbell loader[35]

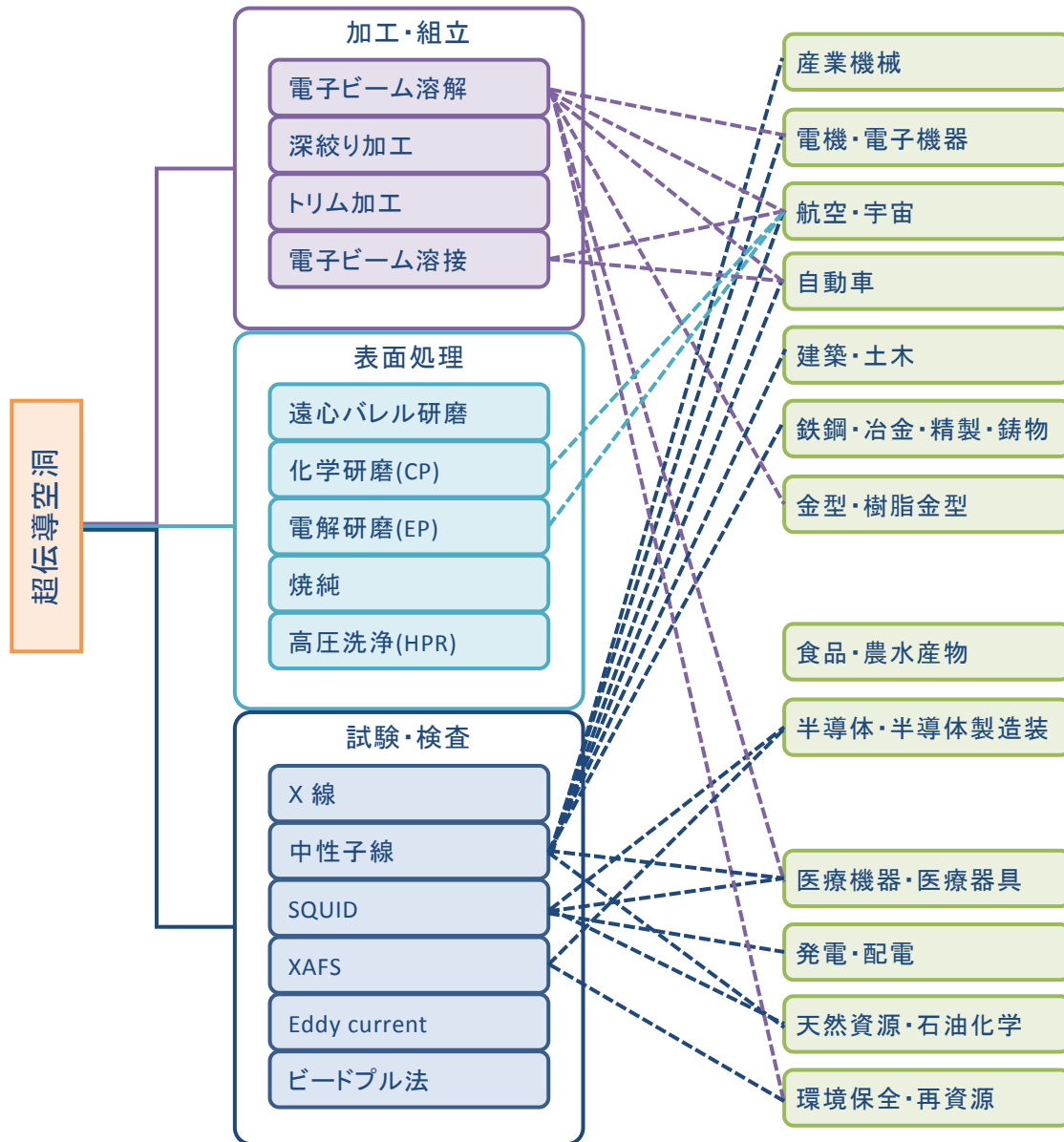


(3) 超伝導空洞の量産化技術の工業的応用

ILC で用いられる超伝導空洞を大量に生産するための技術が、他の工業生産品に応用可能であるかについて調査・分析した。

超伝導空洞の加工・組立などの製造、表面処理及び試験・検査技術が他の工業製品に応用される可能性として技術波及が予想される産業との関連を示す。

図表 I・47 超伝導加速空洞を大量生産するための技術の他工業分野への展開可能性



SQUID: Super Conducting Interference Device, 超伝導量子干渉計

XAFS: X-ray absorption fine structure, X線吸収微細構造解析

ILCの量産化技術の他工業製品へ広く用いられると考えられる応用についての概要を下図表に示す。

なお、XAFSは装置自身が研究所レベルの放射光施設に設置される場合がほとんどであるため、装置の小型化が必要である。

図表 I - 48 量産化技術の他工業製品への応用概要[41~45]

No	技術	応用先産業	概要
1	電子ビーム溶解	電機・電子機器、航空・宇宙、自動車、金型・樹脂金型、医療器具、再資源	<ul style="list-style-type: none"> ・真空中のため不純物の少ない素材製造 ・NbTiスクラップ再資源化 ・各種金属部品製造 ・プラスチック金型
2	電子ビーム溶接	航空・宇宙、自動車	<ul style="list-style-type: none"> ・Tiなどの材料から製造される部品等の表面処理 ・その他金属材料から製造される部品等の表面処理
3	中性子線	産業機械、電機・電子機器、航空・宇宙、自動車、建築・土木、鉄鋼・冶金・精製・鋳物、天然資源・石油化学	<ul style="list-style-type: none"> ・主に非破壊検査 ・半導体デバイスのソフテラー評価 ・社会インフラ検査
4	SQUID	半導体、医療機器	<ul style="list-style-type: none"> ・脳磁場や心臓磁場測定 ・超伝導材料中の磁束の観測 ・プリント基板の電流分布画像化 ・Y系高温超伝導電力機器の非破壊検査
5	XAFS	半導体、環境保全	<ul style="list-style-type: none"> ・非結晶物質の局所構造解析 ・光触媒、排ガス処理触媒、水素吸蔵・放出に関わる触媒 ・発光材料、電池の電極材料、機能性ガラス材料、高耐久鋼材 ・透明導電膜、絶縁膜、光記憶デバイス ・焼却炉焼却灰、汚泥、汚水、土壌処理

< 1 章 : 参考文献 >

- [1] 「ILC 技術の波及効果」,KEK ILC 技術波及効果調査グループ,2007 年 7 月
- [2] 「FALC Technology Benefits study」,FALC,2007.2.7,GDE meeting
- [3] 「International Linear Collider Technical Design Report」,GDE,2013,6
- [4] 「ERL CDR」,KEK,http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/detabase/ERL_CDR_full_text.pdf, 2015.1.22
- [5] 「EUV Lithography」,ASML, <http://www.asml.com/asml/show.do?ctx=28145&rid=48584>,2015.1.22
- [6] 「MYRRHA」,SCKCEN, <http://isolmyrrha.sckcen.be/>,2015.1.22
- [7] 「Transmutation by ADS」,JAEA, http://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/chiba_gr/workshop3/&Oigawa.pdf,2015.1.22
- [8] 「ガンマ線核種分析システム」,JAEA 関西, <http://wwwapr.kansai.jaea.go.jp/aprc/app-gna.html>,2015.1.22
- [9] 「レーザーコンプトン X 線発生装置」,KEK, http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/suishin/open_presen/7th_Hajima_LCS.pdf.2015.1.22
- [10] 「超伝導サイクロトロン治療装置」,VARIAN, <https://indico.cern.ch/event/234471/session/2/contribution/13/material/slides/0.pdf>.2015.1.22
- [11] 「NMR」,JOEL, http://www.jst.go.jp/pr/announce/20110907-2/index.html?utm_medium=twitter,2015.1.22
- [12] 「Mu2e Conceptual Design Report」,Fermilab,TM-2545,2012.3
- [13] 「LCLS II」,SLAC, http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2014/talks/tuoca01_talk.pdf,2015.1.22
- [14] 「スピン偏極走査型トンネル顕微鏡」,OMICRON, <http://www.omicron.de/en/products/spintronics-cluster-tool/instrument-concept>,2015.1.22
- [15] 「偏極低エネルギー電子顕微鏡」,ELMITEC, <http://www.elmitec-gmbh.com/Leem.php?Bereich=LEEM5>,2015.1.22
- [16] 「Future Circular Collider」,CERN, http://www.chipp.ch/documents/Board2014-01/slides_item7_FCC_Board2014-01.pdf.2015.1.22
- [17] 「Circular Electron Positron Collider」,IHEP, <http://indico.ihep.ac.cn/getFile.py/access?contribId=39&sessionId=6&resId=0&materialId=slides&confId=4068>,2015.1.22
- [18] 「1.3GHz 小型超伝導加速器」,KEK, <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130322115000/>,2015.1.22
- [19] 「Superconducting Electron Linacs」,NIOWAVE, <http://www.niowaveinc.com/index.php/products/>,2015.1.22
- [20] 「The Electron-Ion Collider at BNL」,BNL, Vladimir N. Litvinenko, ENC/EIC WS,2009
- [21] 「A high-intensity light-and heavy-ion facility for nuclear structure and reactions」,ECOS-LINCE collaboration,NuPECC,2014.10.10-11
- [22] 「小型中性子源システムで鋼材内部腐食を非破壊で可視化することに成功」,RIKEN, 2013.9.9
- [23] 「小型多用途超伝導電子加速器」,NIOWAVE, <http://www.niowaveinc.com/index.php/products/medical-radioisotopes/>,2015.1.22
- [24] 「Niowave Develops Production Route for Medical Radioisotopes with a Superconducting Electron Accelerator」,DOE-SBIR, <http://science.energy.gov/sbir/highlights/2014/sbir-2014-04-d/>,2015.1.22
- [25] 「Spin off of LC detectors」,CNRS/IN2P3,IEEE LC workshop Anaheim,2012.10.30
- [26] 「From a LC Imaging Calorimeter to a PET Detector」,University of Hamburg,IEEE LC event,2012.10.29-30

- [27] 「ILC Detector R&D:Its Impact」,FNAL,2011.9
- [28] 写真提供 信州大学理学部 竹下徹教授,2013.3.28
- [29] 「DOI-PET 画像構成」,NIRS, <http://www.nirs.go.jp/usr/medical-imaging/ja/study/nextgeneration-pet/7.html>,2015.1.22
- [30] 「Detector Technologies and their applications」,KEK,Junji Haba,OECD,2012.2.28
- [31] 「Applications outside HEP」,CNRS/IN2P3,TIPP2011,2011.6.8-14
- [32] 「Benefits of HEP」,DOE Office of Science, <http://science.energy.gov/hep/benefits-of-hep/>,2015.1.28
- [33] 「Accelerators for Society」,TIARA, <http://www.eu-tiara.eu/Communication/index.php?id=63>.2015.1.28
- [34] 「Developing Accelerator for Energy and Environment at the Illinois Accelerator Research Center(IARC)」,Fermilab,APT seminar,2014.11
- [35] 「STUDY ON FABRICATION OF SUPERCONDUCTING RF 9-CELL CAVITY FOR ILC AT KEK」,Proceedings of IPAC2013, <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2013/papers/thobb203.pdf>,2015.1.29
- [36] 「CFE 空洞製造技術開発施設」,KEK, http://lcdev.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/Test/CFE_001.html,2015.1.29
- [37] 「ILC に向けた超伝導加速器技術開発」,Accelerator Society meeting@Aomori, 2014.8.10,http://pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUOM/SUOM03_oral.pdf,2015.1.29
- [38] 「TECHNICAL DESIGN REPORT VOLUME 3-II : ACCELERATOR BASELINE DESIGN」,GDE,2013.6
- [39] 「SRF Cavity Fabrication and Materials」,CAS-CERN Accelerator School, <https://cds.cern.ch/record/1974052/files/CERN-2014-005-p171.pdf>,2015.2.2
- [40] 「HF2014 REPORT OF WORKING GROUP5: SUPERCONDUCTING RF」,BNL,BNL-107016-2014-CP
- [41] 「多波長 SQUID 顕微鏡による半導体評価」,大坊真洋(岩手大学工学部電気工学科)他、岩手県工業技術センター研究報告第 9 号、2002
- [42] 「高温超伝導 SQUID グラジオメータを用いた多層平行導体の非破壊検査」、河野丈治(国際超電導産業技術研究センター超伝導工学研究所)他、電子情報通信学会,超伝導エレクトロニクス 110、2011.1.17
- [43] 「XAFS の産業利用への適用」,JASRI/SPRING-8,大淵博宜,2006, http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/html/text/06file/glass_ceramic-1/oofuchi.pdf,2015.3.13
- [44] 「中性子イメージングの航空・宇宙、自動車、防衛産業への応用」,日本非破壊検査協会,池田泰(ファインセラミックスセンター材料技術研究所),RADIOIOSTOPES-56, http://www.jrias.or.jp/report/pdf/tyusei_ouyou_03.pdf,2015.3.13
- [45] 「北海道大学における中性子利用技術開発」,北海道大学,鬼柳善明,Gravure Interview, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/79/9/79_801/_pdf,2015.3.13
- [46] 「原子炉内燃料デブリ検知技術の開発」,国際廃炉研究開発機構,平成 26 年度 技術研究組合国際廃炉研究開発機構シンポジウム,2014.7.18
- [47] 「宇宙線で原子炉「透視」」,時事ドットコム, <http://www.jiji.com/jc/zc?k=201503%2F2015030800043>,2015.3.23
- [48] 「世界最高実験精度のミュオン電子転換過程の研究-COMET」,大阪大学素粒子物理学実験研究グループ久野研究室, <http://www-kuno.phys.sci.osaka-u.ac.jp/research/r001.html>,2015.3.23
- [49] 「CTA-計画概要」,CTA-Japan,<http://www.cta-observatory.jp/index.html>,2015.3.23