

7. 夜話：超伝導技術が切り拓く

粒子加速器・物理実験のフロンティア

高エネルギー加速器研究機構

山 本 明

目次

• はじめに	7-1
• 超伝導応用の発展	
• 超伝導体応用の特色	
• 加速器における超伝導応用	7-2
• 超伝導磁石の役割と応用	
• 超伝導加速空洞の役割と応用	
• 粒子検出器における超伝導磁石の応用	7-5
• 役割と特色	
• 粒子検出器用超伝導磁石技術	
• 応用の広がり	
• 夜話トピックス・宇宙観測への超伝導応用： 「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測」	7-8
• まとめ	7-8
感謝	7-10
参考文献	7-10

夜話:

超伝導技術が切り拓く粒子加速器・物理実験のフロンティア

1. はじめに

● 超伝導技術応用の発展

超伝導技術の粒子加速器・素粒子物理実験への応用は、1960年代、粒子検出器技術としての「水素泡箱」を囲む大規模磁場空間生成に始まり、大規模粒子加速器・素粒子物理実験フロンティアを切り拓く基盤技術として発展した[1]。1)

衝突型粒子加速器における超伝導磁石の本格応用は、Tevatron (Fermilab) 加速器に始まる。主リング磁石の超伝導化によってコイル電流密度を高め高磁場を実現した[2-6]。超伝導高周波加速空洞によるビーム加速への本格応用は、Tristan(KEK) 加速器がパイオニアとなった。超伝導化により共振特性(Q値)を高め、省電力、高電界を実現した[7-9]。衝突型加速器・物理実験での超伝導磁石応用は、Pluto 実験(DESY)に始まり、Cello 実験(DESY)において、Al-安定化超伝導線の採用による物質的に透明な大規模磁場空間への道が拓かれた[10-12]。このコイル透明化技術は、Tristan 実験(KEK)、LHC-Atlas 実験(CERN)、宇宙粒子線観測の分野に応用が進展した。これらの超伝導技術を基盤とした高エネルギー粒子加速器・粒子検出器の進展を図1と表1,2に示す。

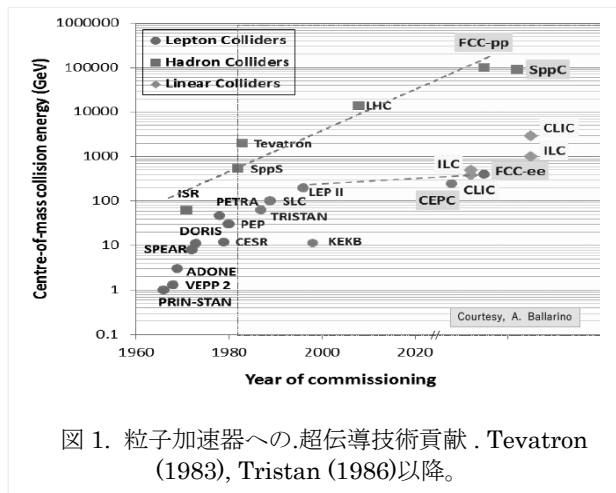


図1. 粒子加速器への超伝導技術貢献. Tevatron (1983), Tristan (1986)以降。

表1. 超伝導磁石、空洞技術を基盤とする加速器の発展。

Acc. (Lab)	Energy [GeV]	B [T]	Operation [years]
Tevatron (Fermilab)	2×980	4.0	1983-2011
HERA (DESY)	820	4.68	1990-2007
RHIC (BNL)	2×100	3.46	2000 ~
LHC (CERN)	2x3500 2 x 6800	4.18 8.12	2009-2022

Acc. (Lab)	Energy [GeV]	E/G [MV/m]	f [GHz]	Operation [years]
TRISTAN (KEK)	2×30	5	0.5	1986-1995
LEP (CERN)	2×105	5	0.4	1989-2000
CEBAF (JLab)	6 → 12	5	1.5	1995 ~
LHC	2×6,800	5	0.4	2009~
KEKB (KEK)	3.5 + 8	5	0,5	1998-2010
Super-KEKB	4 + 7	5	0,5	2016 ~
European XFEL	14	24	1.3	2017 ~

表2. 衝突型加速器・粒子検出器用超伝導磁石(例)。

Name	B [T]	Bore D. [m]	L [m]	E [MJ]
CDF	1.5	3	5.1	30
D0	2	1.2	2.7	
BELLE	1.5	3.6	4	42
BES-III	1.0	2.9	3.5	9.5
ATLAS - CS	2	2.5	5.3	38
- BT	~1	9.4/19.5	26	1080
- ET	~1	1.66/10.6	5	2x250
CMS	4 (3.8)	6	12.5	2600

● 超伝導体応用の特色

直流応用を基本とする超伝導磁石および高周波応用を基本とする超伝導加速空洞において適応可能な超伝導体の特色を表3に示す[13]。

表3. 超伝導磁石、加速空洞用超伝導体の特性。

Material	T _c [K]	B _{c1} [T]	B _{sh} [T]	B _{c2} [T]
Nb	9.2	0.18	0.21	0.28
NbTi	9.2~9.5	0.067	-	11.5~14
Nb3Sn	18.3	0.05	0.43	28~30
MgB2	39	0.03	0.31	39
YBCO	92	0.01	-	100
Bi-2212	94	0.025	-	>100/30
Application		RF	RF	Magnet

超伝導磁石では、上部臨界磁場 (B_{c2}) を上限とする混合領域での応用となり高磁場応用が可能となる。一方、超伝導加速空洞では、純超伝導領域の上限となる下部臨界磁場 (B_{c1}) を基本としつつ、Super-heated 臨界磁場 ($B_{sh} > B_{c1}$) 領域での応用となる (図 2)。

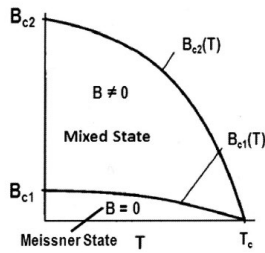


図 2. 超伝導体のマイスナー領域と混合領域。

本夜話では、私自身の超伝導技術応用への取り組み (表 4) を振り返りつつ、加速器・物理実験フロンティアへの応用進展、そして未来へ夢をお伝えする。より詳しい各課題の説明は、本セミナー(OHO-22)各レクチャーにお任せする。なお、「夜話」の機会なので、私自身の研究開発の中で、ユニークに追いつけた究極の課題、「超伝導スペクトロメータによる南極周回飛行・宇宙線観測実験」への取り組みを紹介する。

表 4. 私の超伝導技術応用・支援への取り組み。

Years	Proje	Hosted by
1980s	$\pi 1$ beamline for 12GeV-PS TOPAZ solenoid for TRISTAN	KEK KEK
1990s	BESS solenoid ballooning (Canada) Muon g-2 storage ring WASA solenoid Belle detector solenoid MEG solenoid	NASA/ISAS BNL Uppsala KEK Tokyo/PSI
2000s	LHC-IRQ accelerator LHC-ATLAS detector solenoid BESS-Polar balloon. (Antarctica) SC p-beamline for T2K v-beam	CERN CERN NASA/ISAS J-PARC
2010s	SRF R&D & STF linac (S1-Global) ILC Technical Design Report Muon g-2 ring, moved and re-used	KEK ILC/GDE Fermilab

2. 加速器における超伝導応用

超伝導磁石の役割と応用

粒子加速器における荷電粒子の運動量と円軌道に必要な磁場の関係は $p = qRB$ で表わされ (p : 運動

量, q : 電荷, R : 曲率半径, B : 磁束密度(磁場)), 光速 c 電化 q を 1 と扱うことによって便宜的に $p [GeV/c] = 0.3 RB [m \cdot T]$ と表される. エネルギー (運動量) を高めるためには、磁場を高めることが不可欠となる. 鉄ヨークに依存する常伝導磁石では、鉄ヨーク中での磁場の飽和 ($\sim 2T$) が厳しい制限となる. 超伝導磁石では、電流に依存した磁場発生が基本となり、 $\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ (μ_0 は真空透磁率, \mathbf{J} は電流密度) の関係式に基づく磁場発生となる. 即ち、高い電流密度を実現することで常伝導磁石の制限を超えた高磁場を実現する. コイル形状は、正負の円 (楕円) 電流をずらして重ね合わせ、三日月型 ($\cos \theta$ 型) に近似される電流分布を持つコイルとすることで、均質な偏向 (二極) 及び収束 (四極) 磁場を形成する [14, 15].

CERN-LHC 加速器では、同じエネルギーの陽子を、加速器円周に沿い対向して加速するため、単一鉄ヨーク構造内に対コイルを組み込み、効率良く逆向き磁場を生成する. ビーム衝突点直近では、対向ビームを同一軌道に重ね合わせた後に、単一口径四極磁石によりビームを強く収束する. LHC 加速器では、第二種超伝導体である NbTi 合金を用い、超流動ヘリウム (1.9K) によって冷却することにより主リング(MR)偏向磁場 8.3T、ビーム衝突点(IR)最終収束における磁場勾配 210T/m を実現している (図 3) [16, 17]. 最終収束磁石の開発には、KEK・Fermilab が協力し貢献した. LHC は、重心系エネルギー 7 TeV での物理実験を 2009 年に開始し、13.6TeV での物理実験 (Run 3) が 2022 年からスタートしている。

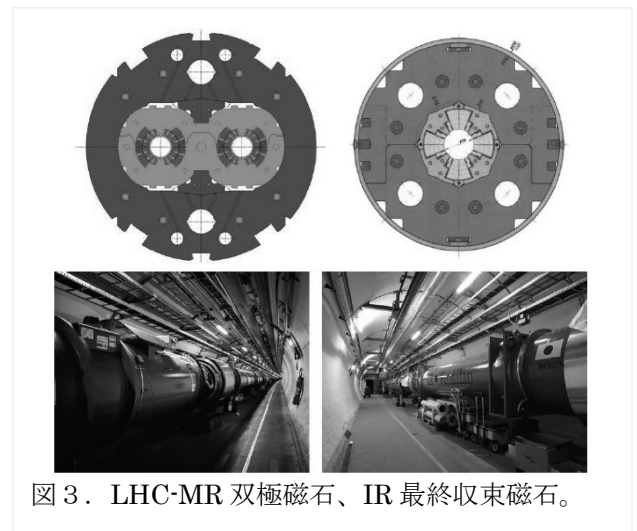


図 3. LHC-MR 双極磁石、IR 最終収束磁石。

また、ビーム輝度向上を目指した High-Luminosity (HL) LHC 計画として、ビーム衝突点最終ビーム収束磁石の大口徑・高磁場化を図るため、米欧の協力で、Nb₃Sn 超伝導磁石の開発が進められている (図 4) [18-20]。この開発を踏まえ、将来計画(FCC)を展望し、16 T を目指した高磁場磁石開発が進められている (図 5) [21-25]。

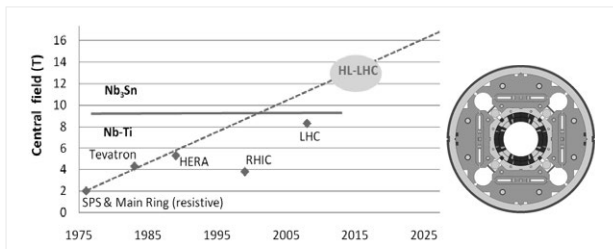


図 4. 加速器超伝導磁石磁場の進展と、HL-LHC における Nb₃Sn 最終収束磁石。

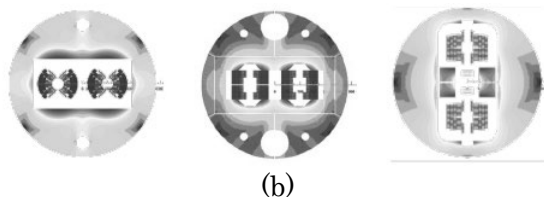
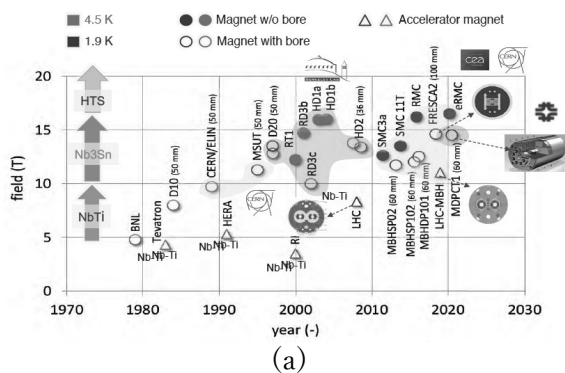


図 5. (a) エネルギーフロンティアを目指した高磁場超伝導磁石開発の進展, (b) FCC 計画での 16 T Dipole の電磁設計 (左から、Cos-theta, Block, Common Coil design) .

KEK では、1980 年代に取り組み始めた Tristan 計画以来、KEKB, そして SuperKEKB 計画に至るまで、ビーム衝突点・最終収束磁石への超伝導技術応用が進展した[26-28]。また LHC 計画への最終ビーム収束磁石開発の経験を踏まえ、J-PARC から神岡・T2K-ν 振動実験に向けた一次陽子ビームラインへの超伝導応用、また HL-LHC 計画への D1 磁石開発へと進展した [29-31]。J-PARC 超伝導ビー

ムラインおよび SuperKEKB・ビーム衝突点において Belle 粒子検出器に挿入される最終収束超伝導磁石組み込みの様子をハイライトとして、図 6 および図 7 に示す。



図 6. J-PARC-T2K ν振動実験・超伝導一次陽子ビームライン。

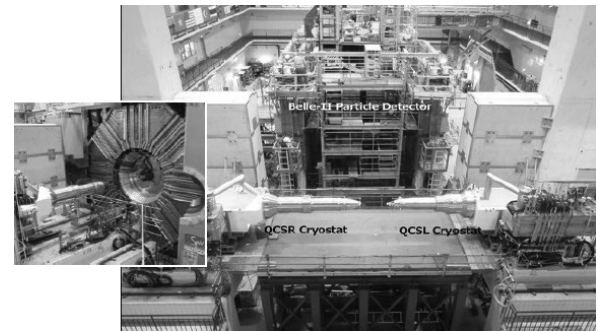


図 7. SuperKEKB ビーム衝突点最終収束超伝導磁石システムの Belle 粒子検出器への組み込み。

・超伝導加速空洞の役割と応用

荷電粒子は、電場によるローレンツ力 ($F = eE$) を受けて電場方向に加速される。シンクロトロンでは円周上の限られた直線部に加速空洞が配置され周回毎に加速される。一方、線形加速器 (リニアック) では、直線状に連結された高周波加速空洞中をその共振周波数と同期して粒子が通過し加速される。エネルギー効率良くビームを加速するために、超伝導加速空洞技術が基幹要素技術となっている [8, 9, 32, 33]。

高エネルギー加速器に使われる超伝導加速空洞は、定在波 (相反進行波の重ね合わせとも言える) モードを基本とし、超伝導高周波加速空洞材料には、第二種超伝導体の中から B_{c1} が高く成形性の良い Nb 材が用いられ、以下の特色をもつ：

- 高周波表皮抵抗が低く、電力効率が低い

- 共振特性係数 (Q_0) が高く ($\sim 10^{10}$)
- ビームパルス長を長くできる ($\sim 10^{-3}$ 秒)
- 大口径化でき (> 50 mm)
- 動作周波数を ~ 1 GHz レベルに最適化
- ビーム強度・衝突輝度を高め易い。

1980 年代、日本国内における SRF 技術は、飛躍の発展を遂げた。KEK・Tristan 計画において、世界に先駆けて超伝導加速空洞によるビーム加速が実現、超伝導加速空洞応用としてのパイオニアとしての役割を果たした[8]。1990 年代には、KEKB 計画での超伝導加速空洞による大電流加速、超伝導クラブ空洞によるビーム高輝度化へと発展し[34,35]、小林・益川先生ノーベル賞受賞(2008 年)に至る輝かしい成果に貢献した[36]。現在、更に高輝度化を目指す SuperKEKB 計画へと引き継がれている。

2017 年には欧州自由電子レーザー (Eu-XFEL) 電子加速器が完成し、すでに 5 年を超える安定した運転実績を重ねている[37]。米国では Linac Coherent Light Source II (LCLS-II) 超伝導電子加速器が、SLAC, Fermilab, JLab の協力によって建設され、完成が近い[38]。このように超伝導加速空洞技術が成熟し、本格的な応用発展期を迎えるなかで、エネルギー回収型超伝導加速器 (ERL)、国際リニアコライダー (ILC) を目指した研究開発が、KEK が中心となって進められている[39, 40]。

Eu-XFEL, LCLS-II, ILC 計画に於いて共通な基盤となる楕円型超伝導加速空洞 (共振周波数 1.3 GHz) 電磁場、構造断面を図 8 に示す。高周波加速空洞内ではビーム軸方向に高周波 (1.3 GHz) 加速電場を発生する。一方、 $rotH \propto dE/dt$ に従い、空洞内表面・円周に沿って磁場を誘起する。空洞最小内径部 (アイリス) でのピーク電界と、空洞最大内径部 (赤道) でのピーク磁場によって超伝導特性が制限される。特に赤道部

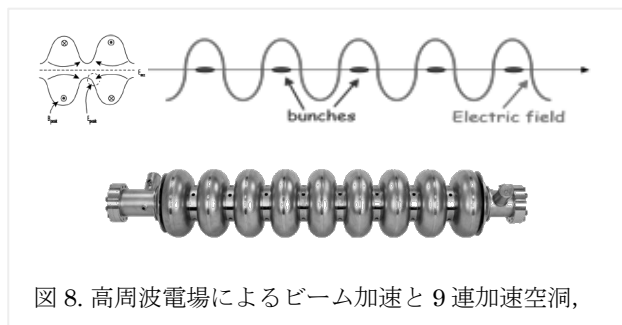


図 8. 高周波電場によるビーム加速と 9 連加速空洞,

での磁場が臨界磁場を超えることが、結果として電界性能を制限する。

超伝導加速空洞における電界性能は、1980 年代に KEK-Tristan, LEP、CEBAF など ~ 5 MV/m でのビーム加速実用化後、着実な進展を果たした。図 9 に示すように、実験室レベルでの単セル空洞では 60MV/m に近づく性能を達成し、多連空洞では 50MV/m 近くに達している[41]。

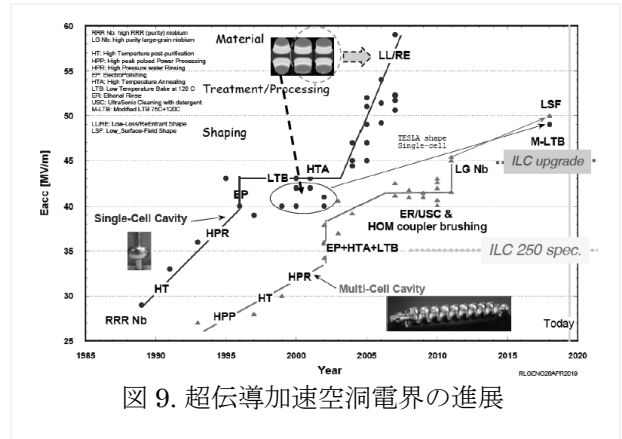


図 9. 超伝導加速空洞電界の進展

超伝導加速空洞性能を引き出す鍵として、空洞内表面処理の研究開発が国際的に進展している。特に Fermilab チームによる取り組みによって、図 10 に示すように、共振性能 (Q_0) の向上と共に、50 MV/m に迫る電界を達成する表面処理が見出された[42]。

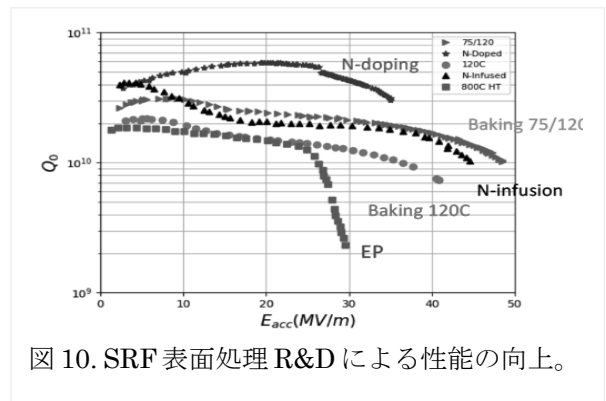


図 10. SRF 表面処理 R&D による性能の向上。

電子・陽電子衝突型加速器のエネルギーフロンティア計画として、超伝導高周波技術を基盤とした『国際リニアコライダー計画』(ILC) が提案されている。2013 年には技術設計書 (TDR: Technical Design Report) を出版、2017 年には Higgs Factory に照準を合わせた ILC250 (250GeV) を第一期計画に定めた[43, 44]。主線形加速器部分には約 8000 台の空洞を必要とし、加速電界は、31.5 MV/m を想定している。

KEK では、2010 年超伝導高周波試験施設 (STF)において、国際協力により持ち寄られた 8 連結された 9 連加速空洞・クライオモジュール (S1-Global) による SRF 性能実証に成功するとともに [45]、国内で開発された超伝導加速空洞を連結し、線形加速器プロトタイプとして組み上げ (図 11)、2019 年には、KEK においても、超伝導加速空洞による線形ビーム加速実証実験に成功している [46]。また KEK における超伝導加速空洞研究、性能向上に向けた技術開発の進展については、OHO-21 セミナーで丁寧に報告されている [47, 48]。

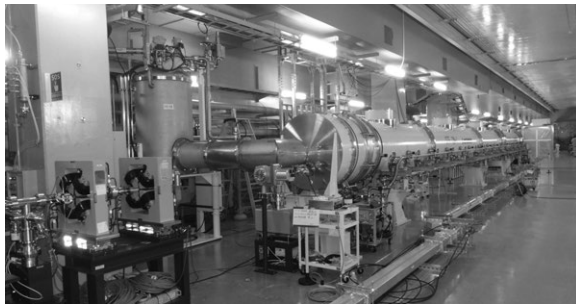


図 11. KEK-SRF 試験施設 (STF). 加速電界 33 MV/m によるビーム加速に成功。

3. 粒子検出器における超伝導磁石応用

・役割と特色

高エネルギー粒子衝突反応を精密に観測する素粒子物理実験では、生成された二次粒子の運動量と速度を測定し、粒子を同定する。運動量分析に利用される磁場形状はソレノイド、トロイダル、ダイポール型に大別されるが、多くの場合、加速器ビーム軸と磁場方向を並行に配置し加速器ビームへの影響を抑制したソレノイド磁場が用いられている。衝突反応による二次粒子の運動量直角方向成分を測定する。磁場中での荷電粒子偏向による円軌道に沿った直線からのずれ s (サジッタ) は図 12 に示されるように近似される [49]。

$$s [m] = \rho (1 - \cos \theta / 2) \approx \rho \theta^2 / 8 = qBL^2 / 8\rho \\ = 0.3 BL^2 / 8\rho [Tm^2 / GeV/c]$$

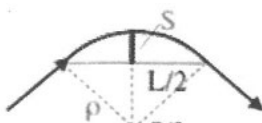


図 12. 荷電粒子の磁場中での偏向サジッタ (s)。

ここで、 ρ は軌道曲率半径、 θ は偏向角、 B は磁場 (磁束密度)、 L は磁場中の軌道長、 p は運動量である。運動量測定分解能 dp/p は p/BL^2 に比例し、 s は磁場に比例するので、大きな磁場空間が有効である。

超伝導磁石技術は磁場空間の大型化を可能にするだけでなく粒子検出器中の物質の低減という基本的な要求に応える。磁石 (コイル) の外側に配置される測定器で観測する粒子は磁石の壁を通り抜けなければならない、その際にエネルギー損失、散乱等を引き起こす。超伝導コイルを使うことで物質を低減 (薄肉・透明化) し、それらの影響を最小化することができる。超伝導技術を用いることによってコイル電流密度を一桁以上高めることができ、磁場 1~4T に至る衝突型粒子検出器用大型超伝導磁石が実現した [10-12]。例として、ATLAS および CMS 粒子検出器およびソノイドコイルの断面図を図 13 に示す。

衝突型加速器用粒子検出器の代表例として、LHC-CMS 実験ではソレノイド磁場を採用している [50]。コイルが発生する電磁力 (フープ力) を超伝導コイル自身が支持できるよう、コアとなる純アルミニウム安定化超伝導線と高強度アルミ合金構造材を複合化する技術によって、物質を低減しつつ高強度化を実現し、中心磁束密度 4T (定常運転、3.8 T) の磁石開発に成功した。

LHC-ATLAS 実験では、ソレノイド磁場とトロイダル磁場を併用している [51, 52]。衝突点を囲む中央ソレノイド磁場を用い、衝突で生成された二次粒子の精密な運動量分析を担い、外側のトロイダル磁場によってミューオン運動量の精密測定を担う複合磁場システムである。中央ソレノイドコイルの外側には液体アルゴンを用いた電磁カロリメータが位置し、その分解能を高める為、ソレノイドコイルの薄肉化・透明化が求められた。このため、

- 高強度アルミ安定化超伝導コイル、
- 高速クエンチ伝播・保護
- 独自の真空容器壁を持たない (共有)

の技術を積み重ね、中心磁場 2T、物質質量 0.66X₀ (輻射長:後述) の超伝導ソレノイド磁石が実現した [44]。ソレノイド外側には、中央部、両端部それぞれ円周方向に 8 コイルで構成されたトロイダルコイルが配置されている。磁場空間が自

己閉回路となるため、鉄リターンヨークが不要となる。荷電粒子はビーム軸方向に偏向され、前後方に磁場空間を通過する粒子軌道が長くなり分解能が向上することが大きな特徴となる。一方、8個のディスク状のコイルの組み合わせとなるため、有効利用可能な分析磁場空間 (~1 T) に対してコイル内ピーク磁場 (~5 T) が非常に高くなる。

KEK では、1970年代に始まった Fermilab CDF 実験のための超伝導ソレノイドの基礎開発への協力から、Tristan-TOPAZ、-Venus、-AMY 実験、KEKB/Belle などを経て[11]、CERN-LHC-ATLAS 検出器ソレノイドへと発展した。

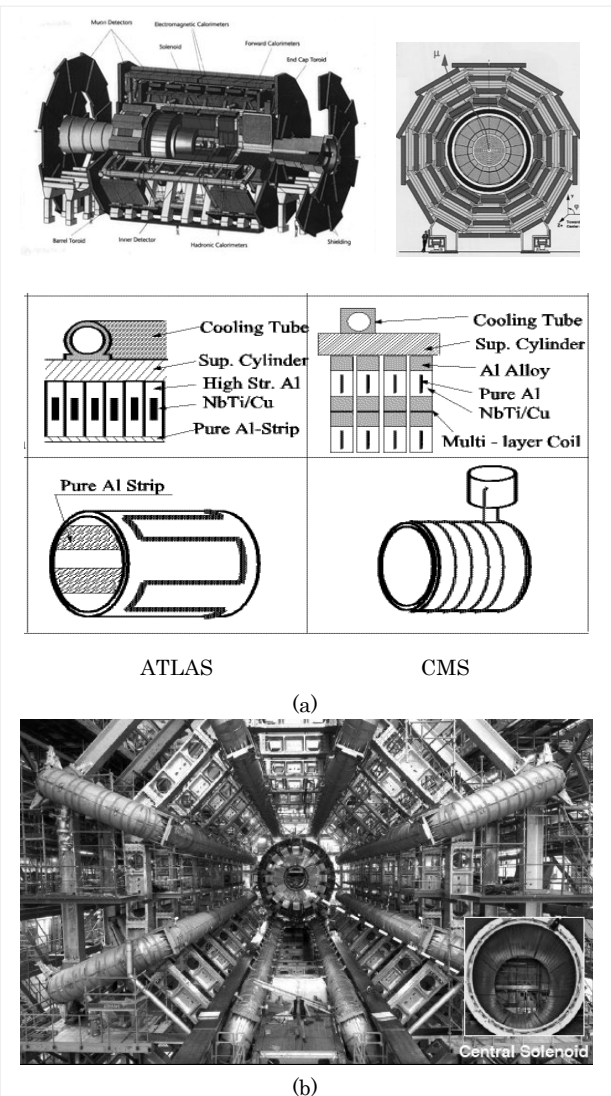


図 13 (a). ATLAS、CMS 超伝導ソレノイド磁石の概念、および(b) ATLAS ソレノイドコイルの、検出器トロイダルコイル空間内への組み込み。

● 粒子検出器用超伝導磁石技術：

指標 - E/M 比： 粒子検出器では、大きな磁場空間をできる限り少ない物質で生成することが要請される。その性能を表すスケーリングパラメータが蓄積エネルギー/コイル質量(E/M) 比である。均一磁場ソレノイドコイルを仮定した場合、以下のように表すことができる[10, 11]。

$$E/M = (B^2/2\mu_0) R/2\gamma = \sigma_h/2\gamma$$

ここでBは磁場、 μ_0 は真空透磁率、Rはコイル平均半径、 γ は平均的なコイル物質密度、 σ_h はソレノイド磁場で生成されるフープ応力である。E/M比は熱力学的エンタルピーH [kJ/kg]にも相当し、 $E/M = H(T_2) - H(T_1)$ とも表すことができる。 T_1 は超伝導運転中のコイル温度、 T_2 は超伝導コイルクエンチ後、電磁蓄積エネルギーがコイルに吸収された後の平均温度である。発生した抵抗をジュール熱としてコイル内で消費し、コイルの温度が T_1 から T_2 まで上昇する。E/M比は、超伝導コイルのクエンチ後、何度まで温度が上昇するかの目安となる。

例として、E/M 比 5 kJ/kg として超伝導コイルを設計した場合、クエンチ後のコイル平均温度は 60 K 以下に留まり、熱歪みが発生する > 80 K より十分に低く保たれ、機械構造設計の安全性が確保される。LHC-ATLAS ソレノイドでは、非常時に、全エネルギーがコイルに吸収されることを前提とし E/M 比 7 kJ/kg に最適化された。LHC-CMS 超伝導ソレノイドでは、コイルに蓄積される電磁エネルギーの 1/2 を外部に取り出すことを前提条件とすることによって、E/M 比 12 kJ/kg (コイルへのエネルギー吸収は ~6 kJ/kg) を実現した。図 14 に E/M 比の進展を示す[12]。

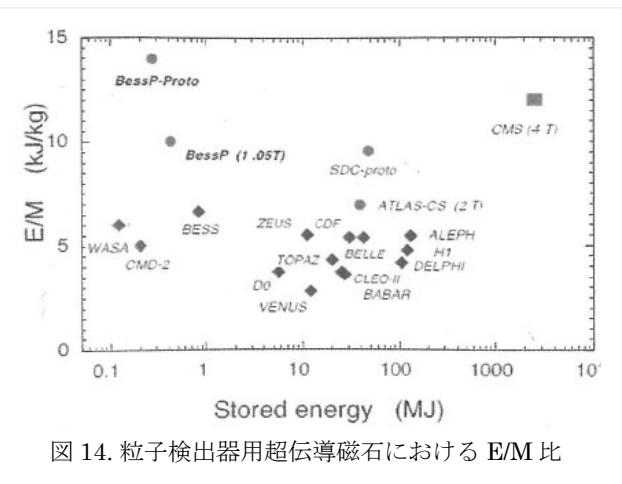


図 14. 粒子検出器用超伝導磁石における E/M 比

透明度（輻射長）： コイルの低物質・透明度は、物理実験の立場から直接的な目安となる「輻射長」で表されることが多い[49]。理想的な無限長ソレノイドコイルにおける磁場は $rot B = \mu_0 J$ で表され、無限長コイルにおける均質磁場では $B = \mu_0 n l$ となる。 J はコイル単位長あたりの平均電流密度、 n は単位長あたりのコルターン数である。半径 R 方向に必要なコイル厚さ t は、コイルを一様な物質と仮定した場合、

$$t = (R/\sigma_h) p_r = (R/\sigma_h) B^2/2\mu_0 = (\sigma_h 2\mu_0)^{-1} R B^2$$

で表される^{9,10)}。ここで σ_h はコイル内フープ応力、 p_r は径方向内圧力である。輻射長に換算すると、 $X = t/X_0$ に規格化される。ここに X_0 はコイルに使用される物質の 1 (単位) 輻射長である。必要なコイル厚さは R に比例することが分かる。大規模空間を必要とする粒子検出器用超伝導磁石の場合、コイルの厚さはクエンチ時にエネルギーを消費し吸収する安定化材断面積と安定化材の強度のバランスで決まる。安定化材には銅よりも輻射長が長くより高強度化されたアルミニウムを用いることが有利となる。ATLAS ソレノイドでは液体アルゴン電磁カロリメータとクライオスタットを共有し、クライオスタット物質の節約も合わせ、中心磁場 2 T、半径 1.25 m において、輻射長 0.66 X_0 を実現した。

アルミ安定化： 大きな蓄積エネルギーを持つ粒子検出器システムでは、超伝導線素線の周囲に配置する安定化材がコイル構造における主たる物質となる。この安定化材にアルミニウム材を採用することより（銅安定化材に比べ）物質を著しく低減することができた。

粒子検出器用超伝導磁石のアルミ安定化超伝導技術は、日本が貢献した Fermilab-CDF 実験用超伝導磁石開発に際し、「Nb-Ti/Cu とアルミ安定化材の同時押し出し法による一体成形」技術開発の成功が礎となった[53]。それを起点として応用が広がり、LHC での ATLAS および CMS 実験用超伝導磁石の開発に至り、高強度アルミ安定化超伝導線技術が確立した[11, 12]。

ATLAS ソレノイドでは、純アルミ材（純度 >99.999%）に Ni を微量(1,000ppm)添加し、同時押し出し法による一体成形後、冷間加工を加えることによって通常の銅安定化材を超える高強

度化を実現した。アルミ安定化超伝導全体としては、140 MPa (@ 4.2 K) を超える強度 (0.2% 耐力) を実現した。CMS ソレノイドでは、磁場 4 T に対するため、さらなる高強度化が求められた。安定化材を含む超伝導体の断面が大きいことを活かし、機械的構造材となる高強度アルミ合金材を電子ビーム溶接によって純アルミ安定化超伝導材の両端に接合する工法が開発された。これによって、Al 安定化超伝導線全体として強度が 250 MPa (@ 4.2 K) を超える開発に成功した。

ATLAS および CMS での経験を融合することで、将来アルミ安定化超伝導線の強度を >300 MPa (@4.2 K) に高めることが期待される[54]。ATLAS 実験用超伝導ソレノイドで開発された高強度アルミ安定化技術(ATLAS)および高強度アルミ合金電子ビーム接合技術(CMS)を融合させた高強度アルミ安定化超伝導線技術開発が重要な開発課題となる。

伝導冷却： 物理実験用超伝導磁石では、物質低減の観点から超伝導コイル伝導冷却技術が、重要な基盤技術となる。図 13 に示されているように、アルミ安定化コイルの外径側に配置されたアルミ・サポートシリンダー外表面に、部分的に冷却配管を分散配置し、二層流ヘリウムを循環させ、超伝導コイルを間接的に（伝導）冷却する。冷凍機からの圧送による強制循環、または超伝導磁石上部に配置したリザーバーからの高低差（重力）を活用したサーモサイホン方式が用いられる[55]。

・純アルミストリップによる高速熱伝搬

ATLAS 超伝導ソレノイドでは、コイル内表面、コイル軸方向に沿って、純アルミストリップが配置されている。これは、図 15 に示されるように純金属（特に純アルミニウム：純度 >99.999%）が極低温で極めて高い熱伝導特性ピークを持つ特色を活用し、コイル軸方向への高速熱・クエンチ伝搬を実現し、コイルの安定性、安全性を高めることに貢献している[10,11]。

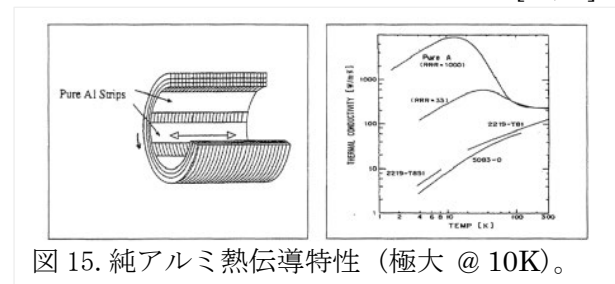


図 15. 純アルミ熱伝導特性（極大 @ 10K）。

・応用の広がり:

宇宙観測への応用:「南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測」高強度アルミ安定化超伝導磁石技術を活かした薄肉超伝導ソレノイドの開発により、中心磁場 1T、口径 0.9m のソレノイド型超伝導コイルを、輻射長 0.1 Xo (プラスチックシンチレータ、1cm 厚さに相当) の薄肉超伝導ソレノイドを実現した。コイル本体およびソレノイドが組み込まれた宇宙線検出器組み込まれたアルミ安定化超伝導コイルを図 16 に示す。永久電流化された超伝導スペクトロメータのカナダおよび南極周回飛行 (高度 35km) 実験において、宇宙線反陽子の精密観測、宇宙反物質探索実験に貢献した [56-58]。

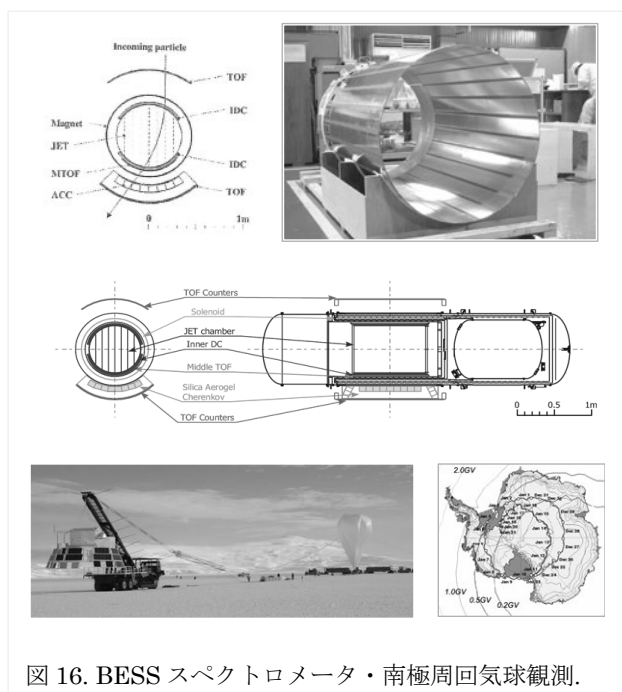


図 16. BESS スペクトロメータ・南極周回気球観測.

ミュオン実験: KEK と日本原子力研究開発機構(JAEA) の協力で推進されている大強度陽子加速器施設(JPARC) において、ミュオン (μ) をプローブとした素粒子実験にアルミ超伝導磁石技術が深く貢献している [59-60]。から取り出された一次陽子ビームから生成されたパイオン (π) の崩壊によって生成される μ ビームを用い、 μ 稀崩壊観測実験(COMET) が計画されている。この実験では、 π 生成、 μ への崩壊チャンネル、 μ ビームトランスポート、崩壊モード観測スペクトロメータに至る全システムに超伝導ソレノイド磁石が採用され、アルミ安定化超伝導磁石技術が駆使されている。

ミュオン異常磁気能率の超精密測定実験では、1990 年代から現在まで、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) から Fermilab に引き継がれて継続推進されているミュオン精密実験において、ミュオン蓄積リングなどにアルミ超伝導ソレノイド技術が本質的な役割を果たしている [61-63]。

重力波探索: 素粒子物理実験における薄肉超伝導ソレノイド磁石を冷却するための伝導冷却技術は、KAGRA 低温鏡冷却に応用されている [64-67]。地下、超低振動環境という厳しい要求のなかで、観測感度を高め、鏡を効率よく冷却するために、素粒子実験・超伝導磁石の開発を通して実績を持つ伝導冷却技術が応用された。新たに開発された極低振動小型冷凍機技術 [と合わせ、重力波探索実験での熱雑音の低減、観測感度向上に重要な役割を果たし果たしている。

4. まとめ:

これまでの歩み

高エネルギー物理学研究所 (KEK、現・高エネルギー加速器研究機構) がつくばに設立されて間もなくの 1977 年、日本における粒子加速器・超伝導技術応用の道を切り拓かれた (故) 平林洋美先生のもとに若手数名が集められ、その一員として私の超伝導技術への取り組みが始まった。KEK 陽子加速器・超伝導 2 次ビームライン [68]、TRISTAN 電子・陽電子衝突実験 (TOPAZ)・アルミ安定化超伝導磁石 [69]、米国・ブルックヘブン研究所におけるミュオン異常磁気能率 (μ on $g-2$) 係数超精密測定実験・超伝導磁石 [62]、南極周回気球・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子探索 [58]、そして欧州原子核研究機構 (CERN) 大型ハドロン衝突型加速器 (LHC)・ビーム最終収束磁石 [16]、ATLAS 実験超伝導磁石開発 [51] 等、約半世紀に亘り、粒子加速器・粒子検出器超伝導磁石技術応用の黎明期から飛躍的発展とともに歩むことになった。この間、次世代を担う多くの仲間、人材が育成され、現在さまざまな計画のリーダーとなってこの分野を先導役を担っている。JPARC におけるニュートリノ振動実験・一次陽子ビームライン

およびミュオンビーム実験[29-31]、KEKB-Belle 実験[71]、Super-KEKB 加速器・衝突点ビーム収束[27,28]、CERN-LHC ビーム輝度向上計画(HL-LHC) [30,31]、そして将来に向けて、周長100km に及ぶエネルギーフロンティア円形衝突型加速器(Future Circular Collider: FCC) 高磁場磁石 (> 15 T)、高温超伝導磁石の基礎技術開発[24] が推進されている。

2007 年、私は、電子・陽電子衝突型加速器・将来計画となる「国際リニアコライダー・国際設計チーム：ILC-GDE」に参画し、超伝導技術開発国際協力推進に取ことになり、専心していた超伝導磁石技術から超伝導加速空洞技術の世界に飛び込むこととなった[72,73]。多くのエキスパートに学びつつ、ILC 国際設計チーム(ILC-GDE) の立場で国際協力の推進役を要請された。2013 年、超伝導加速空洞技術開発の進展を踏まえた技術設計書(ILC-TDR) の出版に至り、2017 年には、Higgs 粒子の精密測定に照準を合わせ、衝突エネルギーを 250GeV とする設計のアップデートが図られた。2017 年、欧州自由電子レーザー施設の完成、物理実験へのビーム提供の開始により、超伝導空洞技術を基盤とした電子線形加速器技術の成熟が実証され、この分野でも、この間、次世代を担う多くの人材が育ち、現在の開発をリードされている。

・未来への夢

私は、基礎科学の進展に、超伝導技術応用を鍵として参画してきた。「科学・教育・文化」が、そしてそのために求められる先端技術が、これからの日本が担うべき国際的リーダーシップの強い柱の一つであるべきだとの思いに基づく。そして、欧州原子核研究機構(CERN) との国際協力を通し、CERN 設立時の理念に深く感銘を受け、思いを強くしている。CERN は第二次世界大戦後の欧州復興に際し、「Science for Peace (平和のための科学)」を掲げ、1954 年に設立されている。基礎科学推進のために、東西に関わりなく人々が協力できる場となり、その精神が堅持され、発展を続けている[74]。CERN で活躍する研究者の年齢のピークは 25-30 才にあり、今も次世代を担う若手研究者のメッカとなり続けている。私はこの素晴らしい例に学び、日本に先端基礎科学・先端技術の開拓を担う国際研究機関(その足掛かりとしての ILC) が実現し、世界各国から多くの研究者が集い協力する事が、日本の将来において国際社会に果たすべき重要な役割の一つであるとの思いを深くしている。大規模国際協力を求める高エネルギー加速器、粒子物理学の分野には、それを牽引し推進するポテンシャルがある。現在、それらの実現に向け、全世界的な規模で超伝導技術を基盤とする技術開発が進められている(図 17) [75]。超伝導技術は、その実現を先導する要となる。超伝導技術がさらに発展し、社会・産業貢献への道を切り拓くことを願っている。

Linear Colliders:
ILC e+e- (250 GeV → 1 TeV) :
 • SRF: for High-Q (10^{10}) and high-G (31.5 MV/m)
 • Highest efficiency and AC-power balance

Circular Colliders :
FCC-e+e- (90 → 350 GeV):
 • SRF: with staging for efficient energy extension
 • Synchrotron radiation (SR) to determine the energy
 • Highest luminosity at Z and H,
FCC-pp (2 x 50 TeV):
 • SC-MAG (SCM: 16 T) for energy frontier
 • SRF: for acceleration for good energy balance w/ SR

CEPC e+e- (2 x 120 GeV):
 • SRF: for acceleration,
 • Synchrotron radiation to determine the energy

SPPC- pp (75 -120 TeV):
 • SC-MAG (12 -20T) for energy frontier
 • SRF: beam acceleration

EIC e- Ion (275/100 GeV/n v.s. 18 GeV, u. constr.)
 • SCM and SRF

MC m+m- (3 – 14 TeV)
 • SRF and NRF with very high-field SCM
 • Higher efficiency at > 3 TeV, although short life-time.

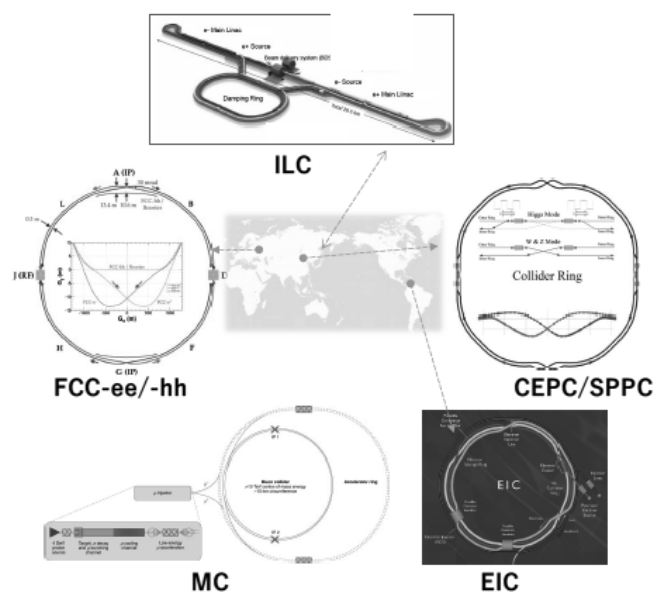


図 17. 粒子加速器分野における将来計画と超伝導技術の貢献。

感謝

粒子加速器・超伝導技術応用の道を切り拓かれた平林洋美先生、小島融三先生に、改めて深く感謝をお伝えする。私が超伝導技術に取り組みを続けた半世紀、多くの方々と協力し、素粒子物理、加速器における超伝導技術応用の発展に貢献できたことを感謝したい。そして現在を先導し、次の世代の発展を担われる皆さまに未来への夢を託したい。

参考文献

- **OHO セミナー**：これまでの OHO シリーズにて、超伝導磁石および超伝導加速空洞技術レクチャーが積み重ねられている。参照されたい：
 - **超伝導磁石**：OHO-87(土屋), -92(新富・大内(徳)/尾崎/土屋), -11(荻津), -19(有本), -22(阿部、有本、飯尾、大内(徳)、荻津、奥野、菊池、木村、鈴木、中西、中本、横田、水島、山本、吉田)。
 - **超伝導加速空洞**：OHO-87(野口), -92(光延), -94(古屋), -05(大内(伸)), -06(古屋、加古、佐伯、大内(徳)), -08(梅森), -11(野口), -14(加古・宍戸・沢辺・増澤), -15(阪井), -17(許斐), -21(片山、道前、Kumar, 後藤)。
- **本夜話での参考文献**：
 - 1) 平林洋美, 「高エネルギー実験への超伝導磁石の応用—その現状と展望」, 日本物理学会誌 **38** (1983) 458-466.
 - 2) 新富孝和, 高エネルギー加速器(木村嘉孝編) 実験物理学シリーズ 7, 共立出版 (2008) p.319.
 - 3) 荻津透, 「ビームを制御する超伝導電磁石」 加速器 **16**, No. 4 (2019) 260-270. 「
 - 4) L. Rossi, and L. Bottura, in “*Review of Accelerator Science and Technology*”, eds. A. Chao and W. Chu#, **5** (World Scientific, 2012) p.51.
 - 5) L. Bottura *et al.*, IEEE Trans. Nuclear Science **63** (2016) p.751.
 - 6) 山本明, 「超伝導技術が切り拓く粒子加速器・素粒子物理実験のフロンティア」, 日本物理学会誌 **72** (2017) 163-177.
 - 7) 小島雄三, 低温工学 **20** (1985) p.144.
 - 8) 古屋貴章, “日本における超伝導高周波空洞開発” 「加速器」 **16** (2019) 251-259.
 - 9) S. Belomestnykh, in “*Review of Accelerator Science and Technology*”, eds. A. Chao and W. Chu, Vol. 5” (World Scientific, 2012) p.147.
 - 10) A. Yamamoto *et al.*, "Development towards ultra-thin superconducting solenoid magnets for high energy particle detectors", Nuclear Physics **B** (Proc. Supplements) **78** (1999) 565 -570.
 - 11) A. Yamamoto *et al.*, “Advances in superconducting magnets for high energy physics and astroparticle

- physics”, Nucl. Instrum. and Methods (NIM) **A 494** (2002) 255-265.
- 12) 山本明, 「素粒子実験・粒子検出器用超伝導ソレノイドの発展と将来」, 加速器 **16** (2019) 295-302.
 - 13) R. Fluckiger, “*Overview of superconductivity and challenges in applications*”, Review of Accelerator Science and Technology, **5**, eds. A. Chao and W. Chu: World Scientific, 2012, pp. 1.
 - 14) M. Wilson, “*Superconducting Magnets*”, Oxford Univ. Press, 1983.
 - 15) K.H. Mess, P. Schmuser, and S. Wolf, “*Superconducting Accelerator Magnets*”, World Scientific: 1996.
 - 16) 山本明, 「超伝導で素粒子に挑む—ラージハドロンコライダー加速器(LHC)における先端超伝導技術の貢献」, 応用物理 **80** (2011) 415-419.
 - 17) Y. Ajima *et al.*, “The MQXA quadrupoles for the LHC low-beta insertions”, NIM **A 550** (2005) 499-513.
 - 18) O. Bruning and L. Rossi Ed. “*The High Luminosity Large Hadron Collider*”, World Scientific, Adv. Series on Directions in HE Physics, **24** (2015).
 - 19) P. Ferracin, G. Ambrosio, E. Todesco *et al.*, “Development of MQXF: The Nb3Sn low-beta quadrupole for the HiLumi LHC”, IEEE TAS **26** (2016) 4000207.
 - 20) E. Todesco *et al.*, “The HL-LHC interaction region magnets towards series production,” SUST **34** (2021) 053001, online available: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abdba4>
 - 21) M. Benedikt, “FCC – High energy collider”, IEEE TAS, **27** (2017).
 - 22) FCC conceptual design report: The European Phys. Journal Topics **228** (2019), online available: <https://fcc-cdr.web.com.ch>
 - 23) L. Bottura, in ESPPU-LDG report. CERN (2022).
 - 24) A. Ballarino *et al.*, Proc. ASC-2018, DOI 10.1 109/ IEEE TAS (2019) 2896469.
 - 25) D. Schoerling *et al.*, “The 165 Dipole Development program for FCC and HE-LHC”, IEEE TAS **29** (2019) 4003109.
 - 26) K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Mag. **27** (1991) 1940-1943.
 - 27) N. Ohuchi *et al.*, “SuperKEKB beam final focus superconducting magnet system”, NIM **A 1021** (2022) 1065930,
 - 28) 大内徳人他, 「SuperKEKB ビーム最終集束超伝導磁石」 低温工学, **54** (2019) 1-10.
 - 29) 荻津透, 「超伝導磁石技術—大型加速器応用」 加速器 **14** (2017) 66-73.
 - 30) 中本建志, 「LHC 高輝度化アップグレードと KEK での超伝導磁石開発」, 高エネルギーニュース, **34** (2015) 185-197.

- 31) 菅野未知央, 「LHC 高輝度化アップグレードのためのビーム分離超伝導双極磁石開発」 低温工学 **52** (2017) 149-156.
- 32) H. Padamsee, “*RF Superconductivity for Accelerator*”, John Wiley & Sons, Inc., (1998).
- 33) H. Padamsee, “*RF Superconductivity*”, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., (2009).
- 34) 古屋貴章, 「KEK-B ファクトリー用超伝導高周波加速空洞—大電流ビーム加速への応用」, 低温工学 **39** (2004) p.452.
- 35) 細山謙二, 「超伝導クラブ空洞」, 低温工学 **43** (2008) p.132.
- 36) 高崎史彦, 「ノーベル賞と低温技術」, 低温工学 **44** (2009) p.1.
- 37) Eu-XFEL European XFEL SC linear accelerator: URL online available: https://www.xfel.eu/facility/accelerator/index_eng.html
- 38) LCLS-II, online available: <https://lcls.slac.stanford.edu/lcls-ii>
- 39) 梅森健成, 「超伝導加速空洞の性能向上に向けた技術開発」, 低温工学 **54** (2019) 267-274.
- 40) 加古永治, 「超伝導空洞を用いた加速器の現状と展望」, 低温工学 **54** (2019) 257-266,
- 41) G. Ciovati and R. Geng *et al.*, Proc. IPAC2013, THYB201, Shanghai (2013). URL a available : <http://www.jacow.org>
- 42) A. Grasselino, TTC meeting, TRIUMF, Feb. 2019. <https://arxiv.org/abs/1806.09824>
- 43) International Linear Collider Technical Design Report (ILC-TDR), (2013), online available: <http://www.linearcollider.org/ILC/>
- 44) L. Evans, S. Michizono, and A. Yamamoto, “International Linear Collider (ILC)-Overview”, J-PASJ (KASOKUKI) **14** (2017) 194 – 200.
- 45) H. Hayano *et al.*, “S1-Global Report”, KEK Report **2013-3** (2013).
- 46) 山本康史他, “ILCに向けた STF-2 クライオモジュールによる 33 MV/m でのビーム加速実証”, 日本加速器学会報告 TUOB03 (2021), KEK news online available: <https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/05/22/1700/>
- 47) 片山領, ”超伝導加速空洞”, OHO-21 セミナー, (2021) p.7-1.
- 48) 道前武, ”超伝導加速空洞の製造”, OHO-21 セミナー(2021) p.8-1.
- 49) 山本明, 「素粒子物理学ハンドブック、山田作衛他編」 (朝倉書店) (2010) p.516.
- 50) A. Herve, *et al.*, “CMS solenoid”, IEEE, TAS (2002) p. 385.
- 51) H. ten Kate, *et al.*, IEEE TAS **15** (2005) p.1267.
- 52) A. Yamamoto, Y. Makida *et al.*: “The ATLAS central solenoid”, NIM A **584** (2008) 53-74.
- 53) 森茂樹, “高エネルギー実験用大型薄肉超伝導ソレノイド”, 日本物理学会誌 **41** (1986) 33-40.
- 54) S. Sgobba *et al.*, “Toward and Improved High Strength, High RRR CMS Conductor”, IEEE TAS **16** (2006) p.521.
- 55) ATLAS Central Solenoid Technical Design Report, ATLAS TDR-9, CERN/LHCC97-21 (1997) p.39.
- 56) A. Yamamoto *et al.*, “Conceptual design of a thin superconducting solenoid for particle astrophysics”, IEEE Trans. Mag. **24** (1988) p.1421.
- 57) Y. Makida *et al.*, IEEE TAS **19** (2009) 1315
- 58) 吉村浩司、山本明, ”素粒子・宇宙論に挑む宇宙線反粒子観測” 日本物理学会誌 **67** (2012) p.844.
- 59) M. Yoshida *et al.*, “Status of superconducting solenoid system for COMET phase-I experiment at J-PARC”, IEEE TAS **25** (2015) 4500904 (3).
- 60) 吉田誠: ”COMET と耐放射線超伝導磁石開発”, OHO-22 セミナー (2022) .
- 61) 岩崎雅彦、山本 明, 「ミュオン時期能率測定は標準理論の破れを検出したか?」 日本物理学会誌 **56** (2001) 848-852.
- 62) 平林洋美、山本明, 「超伝導ミュオンストレージリングとインフレクターの建設における日米協力」 低温工学, **38** No. 3 (2003) 100-107.
- 63) G. Danby *et al.*, “The Brookhaven muon storage ring magnet”, NIM A **458** (2001) p.151.
- 64) KAGRA collaboration, URL available : <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>
- 65) 都丸隆行他, 「低温工学」 **46** (2011) 415.
- 66) T. Tomaru *et al.*, Cryocoolers **13** (2005) p.695.
- 67) 木村誠宏: OHO-22 セミナー, “KAGRA の低温技術” (2022).
- 68) A. Yamamoto, *et al.*, “A superconducting secondary beamline in the 12 GeV proton synchrotron at KEK,” NIM A **257** (1987) p.105.
- 69) A. Yamamoto *et al.*, “A thin superconducting solenoid wound with the internal winding method for colliding beam experiments”, Journal de Physics, **CI** (1984) 337-340.
- 70) K. Sasaki *et al.*, “Development of a SC solenoid for Hiperfine Structure Measurement of Muonium at the J-PARC”, IEEE TAS **22** (2012) 4500904.
- 71) Y. Makida *et al.*, “Performance of a SC solenoid magnet for BELLE detector in KEKB B-factory”, IEEE-TAS **9** (1999) p.475.
- 72) A. Yamamoto, “Superconducting RF cavity development for the International Linear Collider”, IEEE TAS **19** (2009) p.1387.
- 73) 山本明, 「大型超伝導加速器計画: International Linear Collider (ILC)」 低温工学 **48** (2013) 409.
- 74) CERN 設立の理念, ”Science for Peace”, (1949) online available: <https://home.cern/about/who-we-are/our-history>
- 75) ESPPU-CERN/LDG, “European Strategy for Particle Physics, Accelerator R&D Roadmap”, CERN Yellow Report (2022).