

国際協力

CERN との国際協力 —LHC 加速器超伝導磁石の開発協力—

山本 明*

International Cooperation with CERN on the LHC Accelerator Superconducting Magnet Development

Akira YAMAMOTO*

Abstract

KEK–CERN cooperation on the LHC accelerator and detector superconducting magnet development is reviewed as well as on the Japanese industrial contribution to the accelerator construction.

1. はじめに

欧州合同原子核研究機関（CERN）が建設中のラー
ジハドロンコライダー（LHC）加速器計画は、1994
年に建設が決定され、CERN のメンバー国 20 カ国、
および米国、日本、カナダ、インド、ロシア等が参加
し、2007 年の完成を目指し建設が進められている¹⁾。日本政府は、1995 年に LHC 計画への参加を正
式に表明し、メンバー国に準じて（評議会においてオ
ブザーバの立場）予算を拠出し、加速器建設を分担す
ることとなった。主たる取り組みとして 4 カ所の
ビーム衝突点における最終収束用超伝導磁石の開発を
分担するとともに、日本の出資に基づき、日本企業が
直接 LHC 加速器建設の国際入札に参加する道が開か
れ、加速器要素の製造に貢献している。日本の高エネ
ルギー物理実験グループは、LHC 計画における国際
共同実験の一つである ATLAS 実験に参加し、実験
装置の建設、物理解析への取り組みを進めている^{2,3)}。

ここでは、超伝導磁石先端技術における協力を中心
に、国際協力を紹介する。

2. LHC 加速器と国際協力

LHC 加速器は、重心系で 14 TeV の陽子陽子衝突
型加速器であり、米国フェルミ国立加速器研究所
（Fermilab）で稼働中の Tevatron 加速器に対して、7
倍のエネルギー、2 桁高いルミノシティ（衝突頻度）

表 1 LHC 加速器パラメーター

	Tevatron	LHC
Energy (TeV)	0.9 + 0.9	7 + 7
Circumference (km)	0.98 + 0.98	26.7
Luminosity ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	10^{32}	10^{34}
Main dipole field (T)	4.4	8.3
Dipole aperture (mm)	76	56
Completion/Plan (year)	1985	(2007)

を実現する（表 1）⁴⁾。質量の起源とされる Higgs 粒
子の探索、標準理論を越える新たな素粒子現象の探索
を目指す。ジュネーブ近郊の周長 27 km の既設加速
器トンネル内（図 1）に、新たに超伝導先端技術を駆
使したエネルギーフロンティア加速器を建設する。8
つのアーク部から成り（図 2）、1232 台の主偏向電磁
石、386 台の主収束電磁石、5000 台を越える多重
極、補正磁石および超伝導高周波加速装置により構成
される。8 カ所の直線部のうち 4 箇所にビーム衝突点
を持ち、その他の直線部はビーム入射、ビームダン
プ、ビームクリーニングなどの機能をもつ。CERN
Meyrin-site に近い衝突点には、日本グループが参加
している ATLAS 実験装置が建設中である。

加速器建設は、メンバー国を中心として進められ
るが、ビーム衝突点近傍の低ベータ挿入ビーム収束系の
建設はアメリカと日本が協力して分担している。カナ

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK
(E-mail: akira.yamamoto@kek.jp)

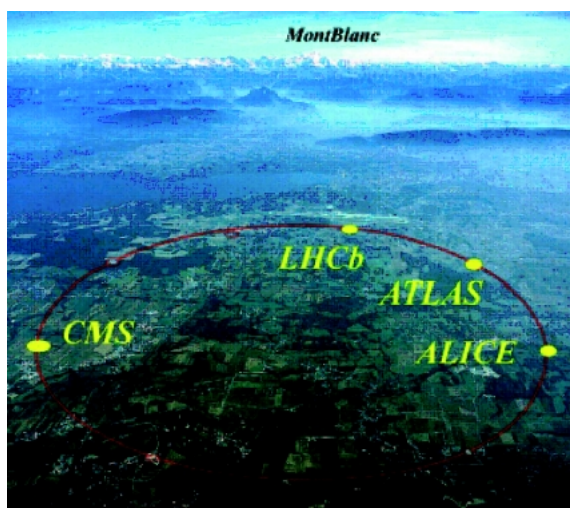


図1 CERN および LHC リング全景.

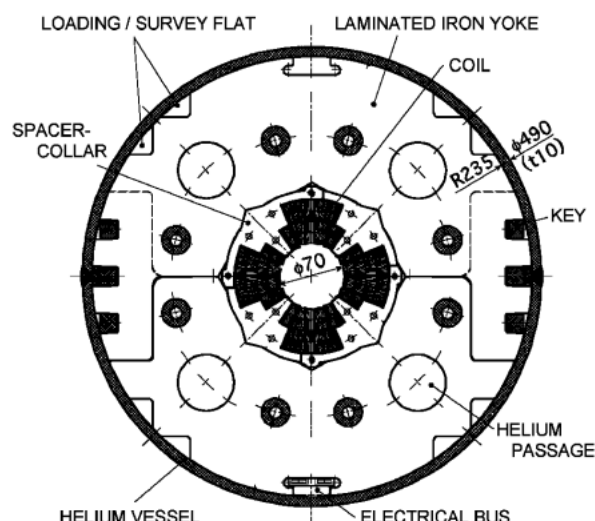


図3 衝突点用四極電磁石断面図 (KEK).

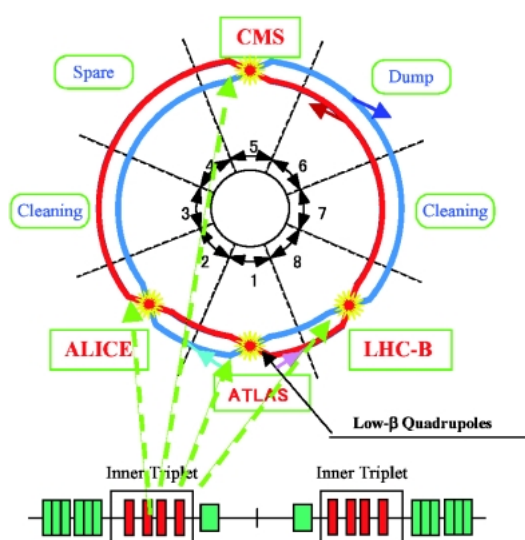


図2 LHC 加速器, 衝突点, 実験のレイアウト.

ダは様々な常伝導磁石, インドは超伝導補正磁石, ロシアはインジェクタからのビーム輸送ライン用(常伝導)磁石等を分担するなど, LHC は, 事実上全世界にまたがる国際協力プロジェクトとなっている. 以下で, 特に日本が分担した衝突点近傍での超伝導磁石開発協力について述べる.

3. ビーム衝突点四極超伝導電磁石の開発協力

ATLAS, CMS 実験の2カ所のビーム衝突点における強収束磁石は, LHC 用超伝導磁石のなかで最も性能要求が厳しい. 衝突点の両側に各4台の四極磁石によりトリプレット強収束系を構成し, 215 T/m の

表2 衝突点四極磁石のパラメータ (KEK 設計)

Field gradient	(T/m)	215
Coil inner radius	(mm)	35
Yoke outer radius	(mm)	235
Magnetic length	(m)	6.37
Peak field in coil	(T)	8.63
Excitation current	(A)	7149
Superconductor load line ratio		0.80
Inductance	(mH)	87.9
Stored energy	(MJ)	2.24
Magnetic force/octant	(MN/m)	1.19 (radial) 1.37 (azimut)

強磁場勾配を直径 70 mm の口径内に発生することが求められ, コイル内の最高磁場は 8.6 T に達する. NbTi をベースとした超伝導線を超流動ヘリウム領域 1.9 K まで冷却することで性能を引き出す. 図3に KEK の設計によるコイル断面を, 表2に設計パラメータを示す. 低ベータ挿入部であることから, 磁場精度に対する要求が特に厳しく半径 17 mm (口径の半分) において, 四極に対する磁場の高調波成分を 10^{-4} 以下に抑えることが求められた. また衝突点で散乱されたビームによるコイルへの入熱が 5 W/m に達すると予想され, それに耐える安定性が求められた. CERN はこれらの開発と製作を KEK, Fermilab に託し, トリプレットの両端 (Q1, Q3) を KEK が, 中央 (Q2a, Q2b) を Fermilab が担当することになった. 磁石の設計は夫々の研究所に任された. KEK は 7 kA レベルでの四層コイルを選択した. この四極磁



図4 超伝導磁石コイル巻き線 (@東芝).

石の特色は、(1)電流密度のグレーディングをもつ4層コイル、(2)非磁性鋼による薄肉スペーサーカラー、(3)上下に分割、キー構造をもつ鉄ヨーク構造である⁵⁾。開発のなかで最も力を注いだことは、磁場精度の達成とその再現性であった。衝突型加速器における低ベータ挿入磁石として、 10^{-4} の磁場精度達成の為に、コイル、磁石の製作精度を50ミクロン以下に制御することが求められた。この為に、コイル設計の再チューニング、再現性の確認、工業化への技術移転等を含み、基礎開発に5年間を要した⁶⁾。KEKでは超伝導低温工学センター、機械工学センター、加速器研究施設、素粒子原子核研究所からの開発メンバーが協力し、1996年より、第一段階としてインハウスでの1mモデル磁石(5台)での技術の確立、性能再現性の検証、実機長プロトタイプ(2台)での技術移転、技術確認を行ったうえで、2001年より実機(予備を含む20台)の製作を行った⁷⁾。実機の製作、試験には3年間を要した。超伝導線材の開発段階で、日立電線、住友電工に、実機製造では、古河電工に担当頂いた。また実機磁石の製造は、東芝に担当頂いた。図4に東芝でのコイル巻き線の様子を示す。

KEKでは図5に示すように縦型の超流動ヘリウム・テスト用クライオスタットを新たに設置して、実機全数の性能試験を行った。試験は、運転最大磁場勾配215 T/mを越える230 T/mまでの励磁(トレーニング)性能、クエンチに対する安全性の確認、磁場測定を行った。全ての磁石が230 T/mに到達した。図6に磁場測定より得られた高調波成分を示す。LHC加速器におけるビーム光学から要求される磁場性能について、いずれの高調波成分も満足する結果が得られた。磁石製造の効率化の為にヨーク2分割構造に伴

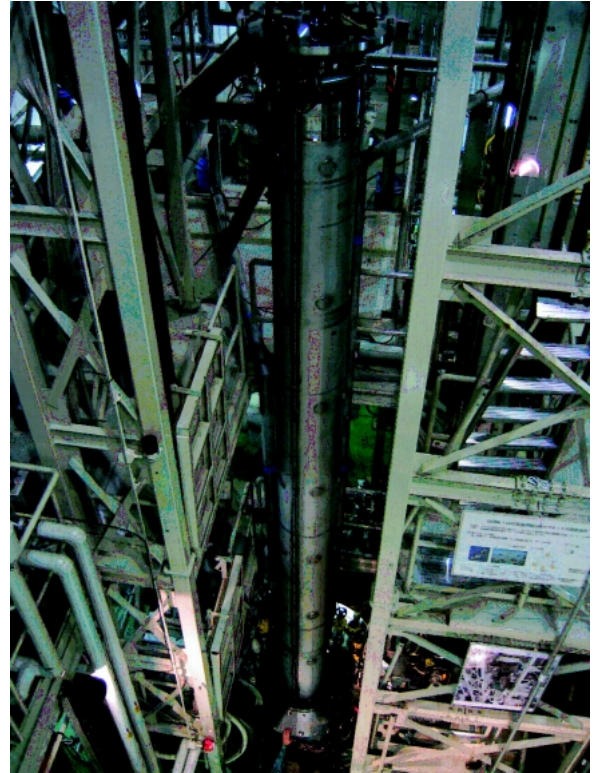


図5 衝突点磁石の性能試験前のテスト用クライオスタットへの組み込み作業 (@KEK).

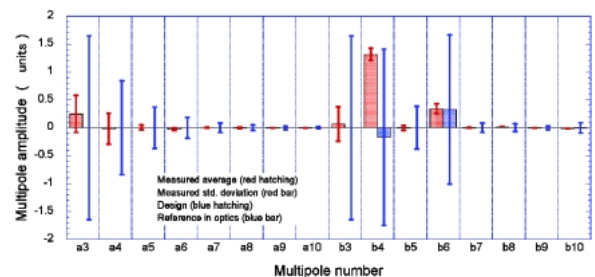


図6 磁場高調波成分(a_n , b_n)の安定性. 斜線部は平均値. 赤線は標準偏差. 青線はビーム光学からの参照値.

う縦楕円変形を示す8極成分(b_4)のみが系統的に大きな値を示しているが、磁石間のばらつきは小さく、磁場精度の再現性はいずれも 10^{-5} レベルで安定している。全数の試験を2004年に完了した⁸⁾。

KEKで試験された超伝導磁石は、協力パートナーであるFermilabに送られ、クライオスタットに組み込まれている(図7)。そのうちの2台についてはクライオスタット組み込み後の性能試験が行われ、KEKでの試験結果が検証された。この組み込み後、磁石はCERNに送られ、トリプレットとして地上でのアセンブリー試験が進められている。全長は~50 mにお



図7 四極磁石のクライオスタットへの組込み (@Fermilab). KEK から送られ、組込みを待つ磁石本体 (手前右). 磁石組み込みを完了したクライオスタット (左). 組込み作業中 (中央奥).

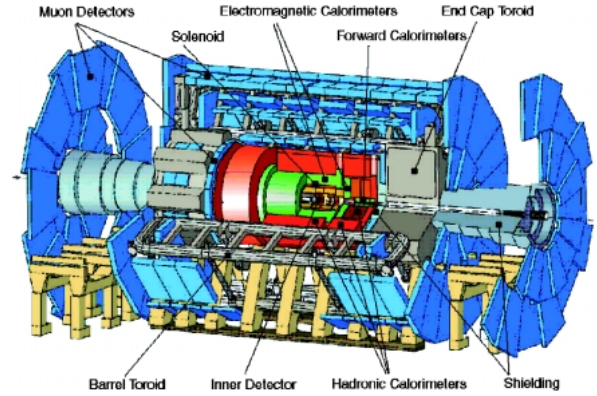


図9 ATLAS 検出器. 中央にKEK が担当した Central Solenoid.



図8 インナートリプレット (Q1-Q2a-Q2b-Q3) の総合組合わせ試験 (@CERN).

よぶ (図8). まもなく、トンネル内への組み込みが開始される。

4. ATLAS 実験用薄肉超伝導電磁石の開発

LHC では、二つの大きな国際共同実験グループ (ATLAS および CMS) が組織され、それぞれ全世界から 1000 人以上の参加による国際共同実験を組織している。日本の高エネルギー実験グループは東京大学、神戸大学、筑波大学、岡山大学、信州大学、広島工業大学、KEK 等が ATLAS 実験に参加し、粒子検出器システムの開発、物理解析準備に取り組んでいる⁹⁾。このなかで、測定器の中央核心部に位置する薄肉超伝導磁石 (Central Solenoid) の開発を KEK が担当し、他の測定器要素に先立ち建設が進められた (図9)。日本のオリジナルな技術である高強度アルミ

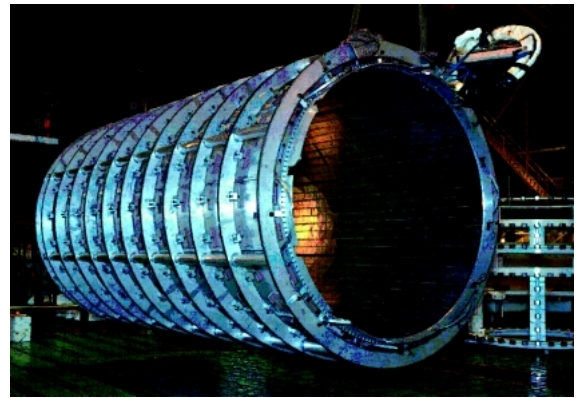


図10 ATLAS ソレノイドコイル (@東芝).

安定化超伝導材による粒子検出器用薄肉超伝導磁石により 2 T の磁場を中央飛跡検出器部に発生させる。外側に位置する電磁カロリメータの分解能を最大限に引き出すため、出来るだけ少ない物質質量での磁場発生が要求され、高強度アルミ安定化技術が、開発の鍵を握った¹⁰⁾。基礎技術開発は、SSC 計画の準備時代に築かれた成果を活用した。純アルミ材に Ni を添加し、加工硬化を組み合わせる技術であり、アルミ安定化超伝導線材自身で主電磁力を支持することが可能となり、究極的な薄肉化が実現した¹¹⁾。この超伝導線材の開発は古河電工との協力による。実機用超伝導線の製造は、日立電線も分担した。また内巻法による超伝導コイルの製造は、東芝に担当頂いた。完成した超伝導コイルは (図10)、日本で試験された後、CERN に運ばれ、液体アルゴンカロリメータと共用のクライオスタットに組み込まれた後 (図11)、総合試験が行われた。その後 ATLAS 実験装置への組み込みに向け、衝突点地下ピットへの搬入が行われた (図12)。バレルトロイド超伝導磁石のアセンブリーの完成後、

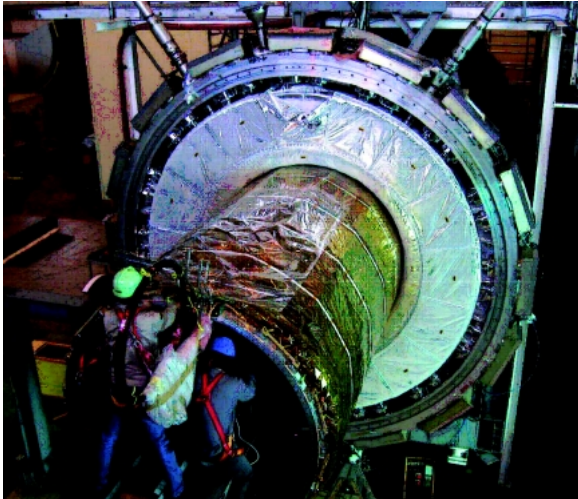


図11 液体アルゴンカロリメータへのソレノイドの組込み。手前は川井 (KEK), 水牧 (Toshiba) の両氏。

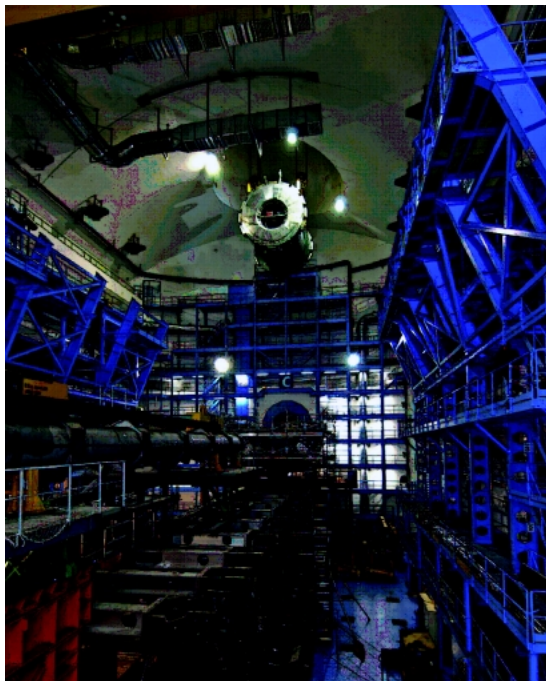


図12 ソレノイドとアルゴンカロリメータのビットへの移動, 正面 上部つり下げ中. 正面奥 (丸いホール部分) には衝突点四極磁石が設置される。

中央部に配置される。

5. 日本企業による直接の貢献

日本が拠出した建設資金をベースとした加速器建設の国際入札への参加を通して, 日本の産業界の技術力を活かした貢献が, 表3に示すように実現した。古河電工による LHC アーク偏向磁石用超伝導線の製造

表3 日本企業による LHC 加速器要素の製造担当

超伝導ケーブル	古河電工
超流動ヘリウム冷凍機	石川島播磨重工/LINDE
非磁性ステンレスカラー材	新日鉄
高マンガン非磁性ヨークボイド材	川崎製鉄 (現 JFE)
ポリイミド電気絶縁フィルム	カネカ

は, 全アークの 1/8 にあたる超伝導ケーブルを製造するとともに, ヨーロッパ, アメリカの企業にも協力した。特に, その品質の安定性と, 生産スケジュールの正確さにおいて高い評価を得た¹²⁾。

冷却技術分野からは, 石川島播磨重工と LINDE (スイス) のコンソーシアムによる, コールドコンプレッサーを中核的な技術とした超流動ヘリウム冷凍機システムが分担された。プロトタイプ開発段階で, 参加企業のなかで熱機械効率の最高記録を達成し, CERN から高い評価を得た^{13,14)}。古河電工, 石川島播磨重工には, LHC 加速器建設における顕著な貢献に対して与えられる LHC Golden Hadron Award が贈られている。

国際機関である CERN でのプロジェクト建設での各メンバー国, 準メンバー国への加速器要素の発注は, メンバー国 (出資国) を対象とした国際入札を大原則としつつ, 最終的に出資に応じた発注額がバランスをするよう, 様々な仕組み, 工夫がこらされている。そうしたなかで, 日本が拠出した予算を土台として, 日本企業が特色ある技術で建設に参加できたことは, 画期的である。日本企業の先端技術への積極的な取り組みに感謝したい。

6. 今後の協力

LHC 加速器建設は, 主偏向磁石の製作が半数を越え, まさに佳境を迎えている。ATLAS, CMS 等の実験装置の建設もピークをむかえている。そのような中で, 運転開始後, 10 年を見据えた, 衝突頻度 (ルミノシティ) を数倍にあげるアップグレード構想 (Super-LHC) の検討がすでに始まっている。リニアック増強とともに, 大きな技術課題となるのが衝突点の最終ビーム収束系のさらなる高性能化, 低ベータ化である。その鍵を握る技術課題が, 収束系磁石の大口径化 (100 mm), 高磁場勾配 (250 T/m) であり, コイル内ピーク磁場は 10 T を大きく越える。これまでの NbTi に代わり, Nb₃Sn, Nb₃Al 等の化合物超伝導線 (図 13, 14) を用いた加速器用超伝導磁石の開発が不可欠となる。コイルエンド部でケーブルの曲げ

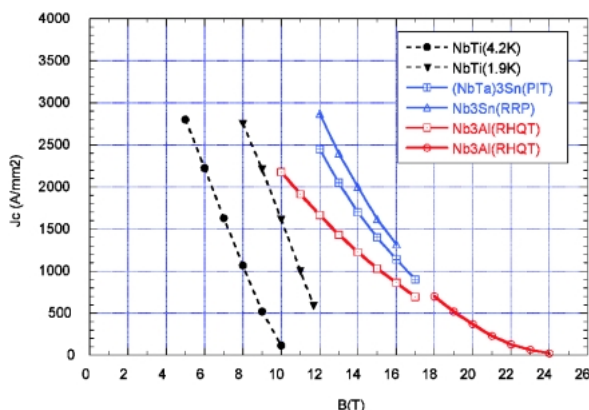


図13 NbTi, Nb₃Al, Nb₃Snの臨界電流密度の比較.

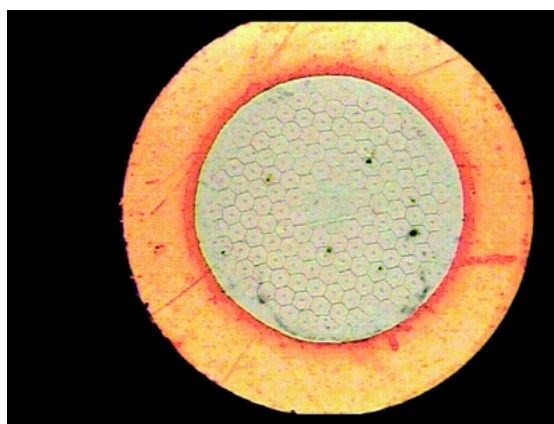


図14 銅安定化材を付加した Nb₃Al 超伝導体断面.

曲率，電磁力の支持，ケーブルの磁化問題など，多くの技術開発課題を抱えている．この為の基礎技術開発において，今後 CERN との協力をさらに進めることを協議している．

特に，日本において物質材料研究機構が開拓した「急速冷却法」を用いた Nb₃Al 線材は，高磁場下で強い機械特性を持ち，長期的な展望（15 T を越える磁石）を見据えた時，地道な取り組みを必要とする重要課題である¹⁵⁻¹⁷⁾．日本独自の技術を活かした開発を推進し，～5 年後に迎えられる実機建設への協力に応えられる技術を確立したい．今後 5～6 年間の期間で，Nb₃Al を超伝導体として，電流密度の増強，安定化材の付加，ケーブル化，超伝導コイルの試作へと，一步一步基礎開発を進めることを計画している．

7. 国際協力の経緯と収獲

CERN/LHC 加速器計画は，1995 年の建設決定，開始以来，10 年を経て，建設のピークを迎え，2 年後に完成，エネルギーフロンティア素粒子物理実験を

開始する．日本の正式な参加に至る道を振り返ってみたい．

LHC 計画がはじまる以前は，東京大学素粒子物理国際センターが LEP 加速器を使った OPAL 実験において CERN との国際協力に大きな実績をあげてきた．また加速器用超伝導電磁石の開発においては，KEK の研究者レベルでの基礎開発での協力が地道に積み上げられてきた．1987 年に筆者が 1 年間 CERN での LHC 加速器用超伝導電磁石開発に参加，また 1989 年に当時の CERN ルビア所長の KEK 訪問による呼びかけに呼応して，10 T 級超伝導電磁石の基礎開発が開始され，CERN との国際協力の芽が育てられた¹⁸⁾．そのような中で，米国の SSC 計画が中止され，全世界が協力する LHC 計画となった．

LHC 計画では，日本が政府レベルで初めて資金協力を含む CERN への国際協力を行った．このことによって，加速器建設への正式な貢献の道が開かれ，KEK の超伝導電磁石開発グループを中核として，ビーム衝突点用超伝導電磁石の開発協力が実現した．また日本が拠出した資金とバランスする範囲内で，日本産業界の特色ある技術を活かした加速器建設への参画が実現したことは意義深い．日本の加速器科学における国際協力のあり方として一つの大きな実績例となった．今後もさらに加速器における国際協力が進展し，日本の役割が確かなものになることを願っている．

CERN との LHC 建設を通しての国際協力は，予想以上に現場での苦労があった．言語の壁，文化の壁を越え，現場に張り付いて解決策を探り，ベストを尽くした CERN，KEK の開発協力メンバーの絆は，今後の国際協力への大切な財産である．

この国際協力を進めたことによって，KEK における超伝導磁石応用の技術開発を通じて，次世代を担う人材が育った．J-PARC におけるニュートリノビームライン用複合磁場（機能）超伝導電磁石システムの建設が実現したが，LHC での国際協力によって力をつけた中堅，若手研究者，技術者が中核となってプロジェクトをリードしている．また開発資産（設備）や技術を最大限，活用することができた．技術開発は，一朝一夕に積み上げられるものではなく，長期的な展望に立ち，地道な積み上げが，10 年後に実を結ぶことが多い．今後，これまでの実績と協力を土台として，LHC アップグレードを視野にいたした基礎開発を進めることを計画している．

8. ま と め

CERN/LHC 計画における加速器用超伝導電磁石の開発協力を中心に国際協力の経緯を紹介した。国際協力を通して、日本の超伝導技術が、国際的にもフロンティアとしての役割を果たすことに貢献できたことは、非常に意義深く、また次世代を担う人材を育てることに貢献した。今後もルミノシティアップグレードを目指した Super-LHC 計画等、さらなる先端超伝導技術に取り組む CERN との国際協力を、より一層大切に育てていきたい。

謝辞

本国際協力の実現にご尽力頂いた皆様に心より感謝し、日本政府、文部科学省による CERN/LHC 計画への協力の決断に感謝したい。KEK においては、KEKB の建設、ニュートリノ振動実験の建設を抱えるなか、超伝導低温工学センターを中核として、LHC の超伝導電磁石開発チームを集結し、開発の推進をサポートして頂いたことに感謝したい。特に KEK、木村嘉孝名誉教授、平林洋美名誉教授、新富孝和名誉教授、素核研、近藤敬比古教授に多くのご指導、ご支援を頂いたことに心より感謝したい。この計画は、以下のメンバーによって進められました。

*LHC 衝突点加速器用超伝導電磁石：

新富孝和，土屋清澄，大内徳人，荻津 透，木村誠宏，中本建志，菅原繁勝，田中賢一，飯田真久，大畠洋克，山本 明

*ATLAS 薄肉超伝導電磁石：

土井義城，槇田康博，川井正徳，近藤良也，山岡広，春山富義，近藤敬比古，山本 明

参考文献

- 1) <http://lhc-new-homepage.web.cern.ch/>
- 2) 新富孝和，“LHC 加速器用超伝導磁石の建設協力”，低温工学，Vol. 31, No. 8, (1996), p. 418.
- 3) 近藤敬比古，新富孝和，木村嘉孝，“CERN-LHC への日本の協力”，低温工学 Vol. 36, No. 10 (2001) p. 562.
- 4) 新富孝和，“大型超伝導加速器の現状と展望”，応用物理，66 巻，4 号 (1997) p. 365.
- 5) A. Yamamoto, et al., “Design study of a superconducting insertion quadrupole magnets for the Large Hadron Collider”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 7, No. 2 (1997) pp. 747-750.
- 6) T. Shintomi, et al., “Progress of LHC Low-beta quadrupole magnets at KEK”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 11, No. 1, (2001) pp. 1562-1565.
- 7) A. Yamamoto, et al., “Production and measurement of the MQXA series of LHC low-beta quadrupoles”, presented at the 2004 Applied Supercond. Conf. (ASC2004), to be published in IEEE Trans. Appl. Superconductivity, Vol. 15, No. 2 (2005).
- 8) Y. Ajima et al., to be published in Nuclear Instrument and Methods.
- 9) <http://atlas.kek.jp/>
- 10) A. Yamamoto, et al., “Design and development of the ATLAS central solenoid”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, (1999) pp. 852-855.
- 11) A. Yamamoto, “Advances in superconducting magnets for particle physics”, Nuclear Instrument and Methods, Phys. Res. Vol. A494, (2003) pp. 255-265.
- 12) S. Meguro, “LHC cable production in Japan”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, (2004) pp. 159-168.
- 13) N. Saji, et al., “A one kPa centrifugal cold compressor for the 1.8 K helium refrigeration system”, Proc. 17th Int. Cryog. Eng. Conf. (ICEC-17), (1998) pp/295-298.
- 14) H. Asakura, et al., “Four 2400 W/1.8 K refrigeration units for CERN-LHC: The IHI-Lide system”, Proc. 18th Cryog. Eng. Conf. (ICEC-18), (2000) pp. 215-218.
- 15) K. Tsuchiya, et al., “Development of Nb₃Al superconducting wire for accelerator magnets”, “IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2 (2004) pp. 1016-1019.
- 16) T. Takeuchi, “Nb₃Al conductor for high-field applications”, Supercond. Sci. Technology., Vol. 13 (2000) pp. R101-R119.
- 17) S. Gourlay, A. Devred and A. Yamamoto “Future accelerator magnet needs”, to be published in IEEE Trans. Applied Superconductivity, (2005).
- 18) 平林洋美，山本 明，“CERN-LHC 計画における高磁場超伝導電磁石の開発”低温工学，Vol. 27, No. 2 (1992), p. 99.