CERN・LHC 計画における高磁場超伝導電磁石の開発

平 林 洋 美, 山 本 明

高エネルギー物理学研究所 つくば市大穂 1-1

(1992 年 2 月 26 日 受理)

Development of High Field Superconducting Magnets for the
Large Hadron Collider (LHC) Project at CERN

Hiroimi HIRABAYASHI and Akira YAMAMOTO

National Laboratory for High Energy Physics, 1-1 Oho, Tsukuba 305

(Received February 26, 1992)

Synopsis:

The European Organization for Nuclear Research (CERN) is preparing for the construction of a new high energy colliding accelerator, the Large Hadron Collider (LHC). High field superconducting dipole magnets with a nominal magnetic field of 10 T will be inevitably required to realize the LHC project. This paper reviews the project and progress of development of the 10 T dipole magnets for the LHC project.

1. 序

CERN (European Organization for Nuclear Research: ヨーロッパ共同原子核研究所) では, 1989 年の Large Electron/Positron (LEP) 加速器計画の完成と実験開始以来、物質の究極構造を説明する標準統一理論の検証における「クォーク三世の決定」等に、輝かしい成果をあげ、電子衝突型加速器として、100 GeV オーダーでの物理を強力に推進している¹⁾。

LEP 計画は超伝導加速空洞の導入等を図り LEP-II 計画としてエネルギー増強を図っていくが、それと並行して、次期将来計画として Large Hadron Collider (LHC) 計画が真剣に検討されつつある²⁻⁴⁾ (Fig. 1, 2)。この計画では、LEP 計画のために現存する周長 27 km のトンネル内に、LEP と共存し、超伝導電磁石技術を駆使して、陽子・陽子衝突型加速器を建設し、10 TeV (10^{13} eV) を越えるエネルギー・フロンティアでの、“物質の究極構造を探る物理の新展開”を計ろうとするものである。

このエネルギー領域では、現在の標準理論を理論的に支える重要な基本粒子群のなかで、ただ一つ手がかりの得られていない、「ヒッグス粒子」探索という重要な物理的テーマをはじめ、エネルギー・フロンティアでの幅の広い物理実験テーマが想定されている⁵⁾。

LHC 計画は、アメリカにおける Superconducting Super Collider (SSC) 計画⁶⁾ に対応する欧州共同のエネルギー・フロンティアを目指す超高エネルギー陽子・陽子衝突型加速器であり、このための基幹機器として 10 T 級高磁場超伝導電磁石、約 2,000 対を必要とする。これによって SSC 計画に対し、エネルギーでは及ばないもの、トンネルのみならず、既存の加速器の主要部を有効に利用し、短い建設期間と約四分の一の予算によって、SSC に先んじて 10 TeV 領域での実験実現を目指している (Table 1: LHC/SSC 比較を参照)。また、将来的には、LHC, LEP マシンを複合した陽子、電子衝突 (1.8 TeV) 等の実験も可能とすべく、両マシンの共存が想定されている (Fig. 2)。

10 T を目指す高磁場超伝導電磁石の開発は、LHC プロジェクトにおける、技術的最重点課題として、研究開発が進められている⁷⁻¹⁴⁾。これまでに、1 m 級 10 T 超伝導電磁石、4 台がすでに開発され、昨秋、そのうちの 1 台が 10 T の磁場を達成した。現在は約 10 台の 10 m 級フルサイズ超伝導電磁石の開発が並行して進められている。また高エネルギー物理学研究所 (KEK) でも、CERN-KEK 間の「加速器将来計画のための技術開発協力・合意」に基づき、1989 年より、LHC 計画用超伝導電磁石を念頭においた、10 T 超伝導電磁石の研究開発が進められている。

Fig. 1 Aerial view of the CERN site.

本解説では、CERN における LHC 用高磁場超伝導電磁石の設計の特色と研究開発の現状を、KEK における研究開発とも比較しつつ、紹介する。

2. LHC 計画と超伝導電磁石システムの概要

LHC 加速器は Fig. 3 に示すように、現存の LEP トンネル内の LEP 加速器の上部空間を利用して建設される。このため、トンネルはもとより、すでに CERN の有する加速器複合体（コンプレックス）の全てが前段加速器群として利用可能となり、最終段の主リングの建設のみを行うことによって SSC 計画に対抗する超大型加速器実験が実現可能となる。一方、現存するトンネル直径が SSC 計画の約三分の一という制約のなかで SSC 計画に近いエネルギーを実現しようとし

Fig. 2 Conceptual view of the CERN accelerator complex.

Fig. 3 Picture of full size model for the LEP/LHC tunnel.

ているため、現在の、加速器用超伝導電磁石技術での限界値と考えられている 10 T 高磁場超伝導電磁石をあえて目指している。さらにビーム強度を SSC 計画よりも一桁以上高めることによって、SSC 計画に十

Table 1 Comparison of LHC and SSC accelerators.

	LHC	SSC
Circumference	27 km	87.1 km
Maximum Energy	7.7 TeV	20 TeV
Nominal magnetic field	10 T	6.6 T
Luminosity	$2-5 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$	$> 10^{33}/\text{cm}^2/\text{s}$
Accelerator tunnel	existing	to be constructed
Injectors	existing	to be constructed
Laboratory	CERN	being established
Future options	e-p, ion-ion	not planned
Construction cost estimation	\$ 2 Billion	\$ 8.2 Billion
Year of completion	to be in 1998	to be in 1999

Table 2 Superconducting magnets to be required in the LHC accelerator.

Type	Magnetic field [$B^{(n)}=d^n B/dr^n$]	Effective length	Number of magnets
REGULAR LATTICE:			
Main dipole magnet	$B^{(0)}=10\text{ T}$	9.0 m	$2\times 1,792$
Main quadrupole magnet	$B^{(1)}=250\text{ T/m}$	3.05 m	2×392
Tuning 4-pole+8-pole	$B^{(1)}=120\text{ T/m}$ $B^{(3)}=1\times 10^5\text{ T/m}^3$	0.72 m	800
Short straight section correctors:			800
Dipole	$B^{(0)}=1.5\text{ T}$		
6-pole	$B^{(6)}=4,500\text{ T/m}^2$		
10-pole	$B^{(10)}=3.2\times 10^7\text{ T/m}^4$		
Central correctors:			800
6-pole	$B^{(6)}=1,600\text{ T/m}^2$		
8-pole	$B^{(8)}=1.8\times 10^5\text{ T/m}^3$		
10-pole	$B^{(10)}=3.2\times 10^7\text{ T/m}^4$		
INTERACTION REGIONS:			
Twin-aperture quadrupole	$B^{(1)}=250\text{ T/m}$	3-5 m	2×226
Single-bore quadrupole	$B^{(1)}=250\text{ T/m}$	6-7 m	2×24
Skew quadrupole	$B^{(1)}=120\text{ T/m}$	0.72 m	60
Separation dipole	$B^{(0)}=5.4\text{ T}$	9 m	6
Dipole corrector	to be defined	0.5 m	286

分対抗できる陽子・陽子衝突型加速器を、先んじて建設しようとするものである。このように LHC は既存のインフラストラクチャーを最大限に利用した、効率のよい加速器建設である。一方、LEP トンネル内での空間的な制限から、基本的には一対の超伝導磁石コイルを共通の鉄ヨークおよびクライオスタット内に実現する、いわゆる“ツインアパーチャー”(Twin aperture: 一対のビームチャンネルを持つ)超伝導磁石システムが必要となる。超伝導磁石は技術の粋を尽くした高度な性能が要求され、大きな研究開発課題となる。

LHC リングの約 9 割にあたる 24 km は超伝導磁石によって占められる。Table 2 にその構成を示す。Fig. 4 に示すように、ビームはトンネルを一周する間に 8 回、ビーム衝突点を通過し、交差するが、ビームの軌道を決めるこれらの超伝導磁石システムは「標準セル」と呼ばれる超伝導磁石の組合せの繰返し(196 回)によって構成されている。その半分にあたるハーフセルは 4 台のダイポールマグネットと 1 台の四極マグネットによって構成される (Fig. 5)。これらの主要なマグネット間に各種の補正磁石が挿入され

る。ビーム衝突点の近傍では一対の並行ビームをお互いに近づけ、正面衝突させるための長い直線部と呼ばれる特別な配置がなされている。ほとんどの超伝導電

Fig. 4 Conceptual illustration for two beam orbits and colliding sections with experiment assignments.

Table 3 Design parameters of the LHC high-field superconducting dipole magnets (CERN Design).

Nominal magnetic field (@ 2 K)	10 T
Operational current	15,060 A
Coil turns (Inner coil)	2×13
(Outer coil)	2×24
Averaged current density in inner coil	357.5 A/mm^2
outer coil	532.9 A/mm^2
Coil inner diameter	50 mm
Coil outer diameter	120.2 mm
Distance between aperture axes	180 mm
Collar outer dimension	$201 \times 381 \text{ mm}$
Iron outer diameter	560 mm
Stored energy for both channels combined	684 kJ/m
Resultant of magnetic forces in the coil quadrant	
ΣF_x	2.27 MN/m
ΣF_y (Inner coil)	-0.23 MN/m
ΣF_y (Outer coil)	-0.98 MN/m
Longitudinal magnetic force	0.7 MN

照)。CERN の設計によるツインアパーチャー・10 T ダイポールマグネットの基本特性を、Table 3 に示す。Fig. 7 にダイポールマグネットの断面図を示す。

この磁石の特徴は

- 1) 中心磁場 8～10 T
- 2) 共通の鉄ヨークおよびクライオスタット内に収められたツインアパーチャー磁石
- 3) NbTi 超伝導線材による 1.8～2 K (超流動ヘリウム) での運転
- 4) 6 ブロックコイルによる精密ダイポール磁場発生

5) カラーおよび鉄ヨークによるハイブリッド電磁力支持構造

としてまとめられる。

コイル構造は基本的には二重殻構造とウェッジ (スパーサー) の組合せによって 6 コイル近似による理想ダイポール磁場の近似を行っている。これにより、6, 10, 14, 18 極等の高調波成分の打ち消しが可能となる。

LHC 高磁場超伝導電磁石の構造的な特色は、600 t/m に及ぶ水平電磁力を、一対のカラー構造とそれを

Table 4 Design parameters of superconducting cables for the LHC 10 T dipole magnet.

	[unit]	Inner cable	Outer cable
Critical current	[A]	>14,800 (@ 11 T, 2 K)	>17,100 (@ 9 T, 2 K)
Overall cable cross section	[mm ²]	2.02/2.48×17	1.3/1.65×17
Number of strands in cable		26	40
Transposition pitch	[mm]	<120	<120
Strand diameter	[mm]	1.29	0.84
Cu/SC ratio		1.6	1.8
Filament diameter	[μm]	5	5
Filament twist pitch	[mm]	25	25
NbTi current density	[A/mm ²]	>1,190 (@ 11 T, 2 K)	>2,280 (@ 9 T, 2 K)

外側より支える鉄ヨークおよび支持シリンダーが連携して支持することである。これによって 10 T の磁場の発生する強大な電磁力をコイル変形を極力 ($50\text{ }\mu\text{m}$ 程度以下) に抑えて支持することができる。

組立を可能とするため、鉄ヨークは左右対称な形であったん半分に分割され、コイルとのアセンブリーを行った段階で外側に支持シリンダーをはめあわせる。冷却の段階で熱収縮の違いを利用し、鉄ヨークを引き締め、一体化し構造物として剛性をたかめている⁹⁾。

3.2 超伝導線材

超伝導線材には、ラザフォード型と呼ばれる平型成形線線が用いられるが、10 T を実現するため、15,000 A 級の大電流線材を用いた「コイルの高電流密度化」を必要とする。Table 4 に 10 T 超伝導電磁石に必要な超伝導線材の設計特性を示す。10 T を実現するためには 11 T、2 K での NbTi 素線電流密度、 $1,190\text{ A/mm}^2$ が目標となる。Fig. 8 に現在の超伝導線材の設計性能をしめす。この条件で線材の使用条件での設計負荷曲線比は 92 % となる。現状では、上記の条件で $1,000\text{ A/mm}^2$ を越える性能が達成されつつある。これまでの実験値から 4.2 K、8 T における臨界電流密度は 1.8 K、11 T における臨界電流密度にほぼ等しいことが知られており、比較的馴染みの深い 4.2 K での電流密度に換算すると、少なくとも 8 T にて、 $1,190\text{ A/mm}^2$ また 5 T において $2,850\text{ A/mm}^2$ 以上の性能が要求される。フィラメント径は $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$ が実用的な最適値と考えられている。この理由は、電流

Fig. 8 Superconductor characteristics for NbTi at 4.2K and 1.8K and Nb₃Sn at 4.2K.

密度の向上と共に、加速器用超伝導線材の特徴として、低磁場、低電流運転時（主リングヘビームを入射し、加速を行う前の状態）における超伝導線内における（磁場の高調波成分の原因となる）残留・永久電流、およびその減衰時定数を低く抑える必要から、ストランド内フィラメント間隔が約 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$ が適当と考えられているためである。

高電流ケーブル化に伴う問題として、内層ケーブル用ストランドには、いわゆるダブルスタック化（一本のストランドを作るのに二回マトリックスのスタックを行うこと）が求められる。また外層ケーブルは 8 T 近辺での大電流密度化が求められることから、40 ストランドによる成型燃線が求められ、超伝導線材としての技術的な課題となっている。

3.3 クライオスタット

前述されたように、非常に限られた LEP トンネルの空間（上部）にマグネットを組み込むため、円筒状のクライオスタット内に配管を含めた全ての要素が無駄なく配置されなければならない。Fig. 7 に示すように、共通化された鉄ヨークを囲む支持シリンダーは超流動ヘリウムクライオスタットとしての役割も果している。

その外側には、冷凍機への戻りガス（5～10 K）温度に連結された輻射シールドが巻かれる。室温容器との中間には、液体窒素温度の輻射シールド層が設けられている。超伝導電磁石本体は、サポートポストによって下から支えられる。Fig. 9 (a), (b) はクライオスタット間のジョイント部をしめしている。LHC 超伝導電磁石用クライオスタットは、加圧超流動ヘリウムによる超伝導電磁石の冷却を可能とするため、後で述べるように、鉄ヨーク上部の孔に水平の超流動熱交換器を貫通させている。加圧超流動ヘリウムによる超伝導電磁石の冷却およびクライオスタットのより基本的な概念は、幸い「低温工学」の前号で解説されているので、そちらを参照されたい¹⁵⁾。

3.4 超伝導電磁石内でのビームロス

LHC のように高ルミノシティ（大ビーム強度）陽子加速器では、荷電粒子の加速中になんらかの原因により正規の軌道から外れた荷電粒子群が、加速円軌道の接線方向に沿って超伝導電磁石コイル内に侵入し、コイル物質内との相互作用によるエネルギー損失によって超伝導電磁石のクエンチを誘発する可能性がある。この現象を「ビームロスにより誘発されたクエンチ」といい、加速用超伝導電磁石における一つの重

Fig. 9 (a) Bird's eye view of the connection of the cryostat and piping.
 (b) Picture of the end part of the LHC twin aperture prototype magnet cryostat with pipe connections.

要な問題となる。このため、ビームチューニングの段階ではビームを単バンチ（ビームを円軌道内、周長に一塊だけ入れること）ビームによる特別に低いビーム強度にて調整を行う必要があるが、それでも 10^7 proton/s のビーム強度が超伝導電磁石にそのエネルギーをダンプする可能性が推定されている。

ビームのダンプによるコイルの温度上昇はクエンチを避けるためには、 0.15 K 以下に抑えられることが必要であり、エネルギー密度にして 10 mW/cm^3 の熱密度に対応する値が 10^7 proton/s に対応する。現在のところこの値が、超伝導電磁石の運転温度を 1.8 K とし、クエンチに対しての超伝導電磁石の温度マージンを 0.3 K と仮定した場合の許容上限値と考えられている。

3.5 クエンチ保護

LHC 超伝導電磁石のクエンチ保護はいわゆる「コールド・ダイオード」方式を前提としている。クエンチが発生した場合、直列に接続された一群のマグネットのエネルギーを全て取り出すことは非常に難しい。一方、一連の超伝導電磁石のエネルギーがクエンチを起こした一つの超伝導コイル内でジュール熱として局部的に消費されることは非常に危険である。特に 10 T を発生する LHC 高磁場超伝導電磁石は、空間的な電磁エネルギー密度が極めて高く、超伝導電磁石が個個小さな単位で独立に保護されることが重要である。そこで個々の超伝導電磁石に並列にダイオードを接続することにより、抵抗の発生したコイルに対しては、主電流をバイパスさせ、その他の超伝導電磁石のエネ

ルギーを外部に回収することでシステムの保護を図る。この方式では、クエンチを起こしたマグネットには、全長にわたるヒーターを用いて瞬時に全体にクエンチを伝播させ、エネルギーの局所的なダンプを避ける。クエンチが検出された場合、フィードバック回路により、このヒーターに放電用コンデンサーから電流パルスが供給される。

「コールド・ダイオード」は電流リードに伴う冷却系の熱負荷を抑えるよう、マグネットに近接した低温部に組み込まれる。同様の概念は HERA プロジェクトでも採用されているが、LHC 超伝導電磁石では電流値が大きく、現在の規格品ではダイオードの並列運転が必要となってしまう。並列運転に伴うバランス抵抗等の複雑さを避けるため、大電流 (15,000 A 級) ダイオードの開発が精力的に行われている。現在のところ、 $10^{10} \text{A}^2 \cdot \text{s}$ の電流・時間積分まで耐えられる 15,000 A 級ダイオードの開発が進んでいる。このコールド・ダイオードの一つの問題点として、高レベルでの放射線環境下でのダイオードの特性劣化が心配されるが、「熱的なアニーリング」や「大電流パルスによるキャリア注入」によって特性の回復が可能であることが、研究の結果として報告されており、実用化の見通しがつきつつある。

クエンチが検出された場合、超伝導電磁石システムは、直ちに 150 A/s 以上のスピードで消磁される。エネルギーの回収はリングに分散し配置されたエネルギー回収抵抗によって行われる。このために、主リングの電源はグループ化され、トンネル円周に沿って分散されている。

4. 冷却システム

4.1 基本的設計概念

LHC 高磁場超伝導電磁石の冷却には、1 気圧の加圧・超流動ヘリウムが冷媒として用いられる。粒子加速器用超伝導電磁石のように、水平に細く長い熱負荷

Table 5 Estimation of distributed steady-state heat loads in the main dipoles(W/m).

Temperature	80K	5K	1.8K
Bare heat inleakage	6	0.4	0.15
Resistive heating			0.15
Beam induced heating		1.7	0.01
Total	6	2.1	0.31

に対しては、冷媒の振舞いの安定化を図るため、強制、単層流による冷却が最も適している。超流動ヘリウム温度を必要とする理由はすでに述べた。加圧超流動ヘリウムの温度は超流動温度発生熱交換器によって冷却・発生され、運転温度は熱伝達率が最大となる 1.9 K (最大) を設定している。特にマグネットの励磁、消磁時に最大の冷却パワーを必要とする。また急速消磁の場合においても、冷媒温度が臨界温度(入点)を越えないことが必要となる。冷却システムには三つの温度レベルの冷媒が必要となる。

- ・ 1.9 K : 超伝導電磁石の冷却用
- ・ 4~5 K : 熱アンカーおよび液体ヘリウムの初期充填用
- ・ 50~75 K : 輻射シールドおよび熱アンカー用

4.2 熱負荷

各温度レベルの単位長あたりの侵入熱は Table 5 に示すとおりである。このなかで、抵抗 (ジュール) 発熱による入熱は超伝導線の接続によるものである。またビームによる入熱は、以下のように、いくつかのプロセスによる。

- ・ シンクトロン輻射 (最大 1.2 W/m)
- ・ ビームによる誘導電流によるビームパイプ中での渦電流損 (最大 0.53 W/m)
- ・ 周回ビームのコイルへの直接入射 (オーダーとして最大 10W/10cm))

励磁その他の過渡的なモードとしては、励磁の際に通常の 1,200 秒での励磁をした場合、480 J/m の発熱が超伝導ケーブル内に発生する。これは 0.4 W/m の発熱量に相当する。クエンチ等で急速に消磁した場合に

Table 6 Approximate quantities of materials to be required in LHC.

Material	Quantities (t)
Superconductor	400
Electrical insulator	180
Copper Spacer	260
Aluminum collar	3,000
Low carbon steel	22,000
Auxiliary component	3,700
Stainless steel	4,500
Thermal intercept (aluminum)	1,000
Total mass	36,000
Cold mass (4.5K and 1.8K)	30,000

は非常に大きな入熱がヘリウムに負荷としてかかるが、これらはリング全体として 400,000 l に及ぶ液体ヘリウムによって一時的に賄われることになる。

初期冷却時、LHC 全体としては、Table 6 に示すように、30,000 t の冷却重量を 25 日間以内に冷却ま

たは加温することが求められる。

4.3 冷却システム

LEP トンネルは、水平に対し、 1.4° の傾きをもっており、高低差として最大 120 m が発生する。このため、前に述べた理由とともに、その水頭圧差による

Fig. 10 Concept for cooling scheme with pressurized superfluid helium.

Fig. 11 The LHC half-cell cooling loop with pressurized superfluid helium.

Table 7 Octant refrigerator performance.

Isothermal refrigeration power(@ 1.8K)	1.8kW
Non-isothermal refrigeration b/w 4.5-10K	8.5kW
Liquefaction power at 4.5K	30 g/s
Non-isothermal refrigeration b/s 50-75K	30kW

不安定をなくすためにも、基本的に単相流による冷却が好ましい。またトンネル内での安全の観点から極低温機器は地上に設置することを原則として設計されている。

加圧超流動によるヘリウムによる加速器超伝導電磁石の冷却概念を Fig. 10 に示す¹⁶⁾。加速器用超伝導電磁石は横型で非常に長い距離にわたることから、超流動発生部と熱交換器部は分割されており、フレキシブルチューブによる熱交換部は超伝導電磁石の鉄ヨーク部に開けられた孔部にはめ込まれるようになっている。実際の加速器システムでの配置では、Fig. 11 に示すように、4 台のダイポールマグネットと 1 台の四極マグネットの熱交換器がハーフセル単位にシリーズに結ばれる。ハーフセルの片端には減圧によって飽和蒸気圧となった超流動ヘリウム槽内に熱交換器を通して一気圧 2.2 K ヘリウムを通過させ、その後の JT 膨

張弁によって飽和蒸気圧となった超流動ヘリウムで超伝導電磁石用クライオスタット内の (1 気圧) 液体ヘリウムを冷却、循環している。空間およびコストを節約するため、全ての低温配管は超伝導電磁石・クライオスタットのなかに、格納されている (Fig. 9(a), (b))。Fig. 12 は冷凍機および配管系の各ハーフ・オクタント (1/8 周の半分) ごとのレイアウトを示している。全長は 1,700 m に及ぶ。

以上の設計から、LHC のオクタントを受け持つ冷凍機システムには、Table 7 に示す冷凍機性能が必要となる。

CERN ではすでに LEP-Ⅱ 計画において、超伝導加速空洞を用いたエネルギーの倍増計画が進行中であり、そのためのオクタント (一部) あたり、12kW (4.5 K) の冷凍機が設置されることになっている。これらは LHC 計画のために、1.5 倍の増強によって転用することが可能となる。

5. CERN-KEK の加速器用・高磁場超伝導電磁石開発協力

1989 年に、CERN-KEK 間において、「高エネルギー粒子加速器の将来計画に関する技術開発協力を推進

Fig. 12 Isometric view of the LHC cryogenic system for a half octant of the LHC tunnel.

Table 8 Comparison of CERN-KEK twin aperture 10 T dipole design.

	CERN	KEK
Coil:		
Configuration	6 blocks	Double-shell
Number of turns; inner coil	13	16
outer coil	24	24
Wedges	4	None
Conductor width	17 mm	15 mm
Keystone angle	1.48 degree	4.61 degrees
Collar:		
Configuration	Double-collar	Split and twin
Left/left symmetry in a bore	Non symmetric	Fully symmetric
Material	Al alloy	High-Mn steel/Al hybrid
Outer radius	100 mm	90 mm
Features:		
	Less harmonics	Split and symmetric

Fig.13 Comparison of the CERN and KEK 10 T twin aperture dipole magnet design.

する」ことが合意され、その一つの課題として、CERN および KEK で独立に進められてきた高磁場超伝導電磁石の開発実績^{17,18)}を基に、「高磁場超伝導電磁石の開発」が推進されることとなった。この合意に基づき、KEK では、CERN・LHC 計画における 10 T・ダイポールマグネットを目標においた高磁場超伝導電磁石の研究開発をスタートさせた。この計画では、CERN での研究開発と、互いに相補的な開発協力となるよう、超伝導電磁石としての口径、磁場、大きさの制約等の基本パラメーター以外は KEK 独自の設計概念に基づき開発を進めることとなった^{19~21)}。この結果 KEK では

- ・高キーストン角超伝導線材開発によるウェッジレスコイルの開発
- ・完全対称分割型カラー構造によるツインアパーチャー超伝導電磁石の開発
- ・シングルアパーチャーとツインアパーチャー超伝導電磁石の精密特性比較

を特色とした高磁場超伝導電磁石の基礎開発を推進している。Table 8 および Fig.13 に CERN と KEK での設計概念の特色比較を示す。

LHC 高磁場超伝導電磁石実現の困難さは、10 T を目指す高磁場に加え、ツインアパーチャーとするところにある。KEK での設計では、まず、高キーストン

Fig. 15 Picture of the CERN twin aperture dipole achieved to 10 T at 1.8 K.

磁石としても使用できることである。このため、困難なツインアパーチャー磁石を着実にステップを踏んで開発していくことが可能となり、またシングルアパーチャーおよびツインアパーチャー磁石間の精密な特性比較を行うことも容易となった。Fig. 14 に KEK 設計におけるシングルアパーチャーおよびツインアパーチャー・ダイポールマグネットの断面図および磁束線の流れの様子を比較して示す。コイル内の磁場は全く対称かつ同一であるが、鉄ヨークのなかでは、磁束線の流れ方が全く異なることがよくわかる。またこの違いによって、ツインアパーチャー・ダイポールマグネットが、空間的にいかに節約型であるかがわかる。ちなみに、全く同じコイル・カラー構造を採用した場合、シングルアパーチャーとツインアパーチャーでは磁石外径が 540 mm と 580 mm で、ほとんど変わらない結果となった。

6. まとめ—開発の現状と今後の展開—

CERN での LHC 用高磁場超伝導電磁石開発はすでに 1985 年よりすすめられており、1987 年よりヨーロッパの 4 社が開発に協力し、これまでにのおおの 1 台 (計 4 台) のモデルマグネットを試作した⁸⁾。昨年 10 月その内ジュモンシュナイダー社 (フランス) の協力したツインアパーチャー超伝導電磁石 (1 m モデル) が CERN のテストベンチでの試験でついに 10 T を達成した。これは高磁場超伝導電磁石の開発の歴史における大きなイベントであった。Fig. 15 にその磁

石の写真を示す。しかしながら、相当数のトレーニング (クエンチを繰り返しながら磁場性能が向上していく現象) を経た結果の到達であり、また加速器用高磁場ダイポールの難しさを示したものともなった。一方、フルサイズの超伝導電磁石およびクライオスタットを模擬する手段として、HERA (DESY) 計画で開発されたコイル (4.2 K で約 4.7 T) を流用した、ツインアパーチャー 10 m 級の「プロトタイプ超伝導電磁石」が並行してすすめられた¹⁴⁾。つい最近、フランスのサクレイ研究所において、フルサイズ横型クライオスタット内における、加圧超流動ヘリウムによる冷却・励磁実験が行われ、1.8 K において定格電流値まで達する実験に成功した。このことによって、ツインアパーチャー超伝導電磁石における 1.8 K での冷却方式が基本的に機能することが証明された。現在は 1 m モデルの開発と並行し、10 m 級のフルサイズ 10 T 超伝導電磁石の開発が進行中であり、約 2 年以内に加速器ハーフセル (ダイポール、4 台、四極、1 台のストリング) を模擬したテストベンチを建設し、フルスケールでの超流動ヘリウム冷却、励磁試験を行うことになっている。

一方、最近になって米国 SSC 計画での超伝導電磁石の口径サイズ変更 (40→50 mm) が決定されるとともに、CERN・LHC 計画でも加速設計に対する磁場性能の余裕、またビームロスに対するクエンチ保護の観点からコイル口径サイズの変更 (増大) が検討されつつあり、現在の 50 mm から 56 mm へ変更される可能

Fig. 16 Picture of the KEK single aperture dipole achieved to 8T at 4.2K.

性が大きくなっている。この場合、R&D計画を再度繰り返す必要があり、一年以上の計画の遅れは避けられないと思われる。

KEKでの開発は3年を経過しているが、昨年末、シングルアパーチャー磁石が完成し、本年2月に行われた4.2Kでの試験で、定格値である中心磁場8Tを達成することができた。この結果はこの磁石が2Kにおいて中心磁場10Tに到達する条件を満たしている。Fig. 16にこの磁石の写真を示す。現在、CERNと協力して、1.8Kでの試験を行うべく準備をすすめている。このKEKでの開発には、(株)東芝、古河電工(株)および新日鐵(株)各社のご協力をいただいている。

CERNのLHC計画が、アメリカのSSC計画に対抗しエネルギー・フロンティアの物理に成果を示すためには、超伝導電磁石の高磁場化とともに、加速器を早期に建設し、SSC計画に先んじて実験を開始しなければならない。それだけに着実な開発の進展が必要であり、ヨーロッパ各国の特性を持ち寄った強力な国際的な技術協力体制が組まれている。「SSC計画への日本の協力」について、アメリカからの協力要請が高まるなかで、日本からのCERN・LHC計画への優先的な国際協力は、容易とは考えられないが、日本がこれまでの技術的蓄積を生かし、超伝導電磁石技術の分野で、先端的な役割を果たしていくためには、LHC計画のような技術的难度の高い、先端的な開発に一定の力を注いでいくことが不可欠であり、重要であろう。SSC計画への協力とともに、LHC計画への国際協力がバランスのよい形で進められることを、筆者は望むものである。

この解説を執筆するにあたっては、CERNのG. Brianti 博士、R. Perin 博士、D. Leroy 博士、Ph. Lebrun 博士、T. Taylor 博士らより資料の提供をいただいた。またR. Perin氏の、一昨年秋の山形での低温工学会での特別招待講演の内容の一部を、参考に使わせていただいた。資料の整理にあたっては、総合研究大学院大学の川畑秋馬氏（現在は鹿児島大学所属）および高エネルギー研の田中佐代子氏にご協力いただいた。また高エネルギー研における高磁場超伝導電磁石の開発にご協力いただいている各社、各位の方々に紙面を借りて心より感謝申し上げたい。

参考文献

- 1) 竹下 徹, 折戸周治: 日本物理学会誌 46(1991) 643
- 2) G. Brianti: *The Large Hadron Collider (LHC)*, Proc. of the High Energy Accelerator Conference, Tsukuba (1988)
- 3) G. Brianti: *The Large Hadron Collider (LHC) in the LEP Tunnel*, Proc. of the 2nd European Accelerator Conference, Nice (1990) LHC-Note 123
- 4) G. Brianti, et al.: *Design Study of the Large Hadron Collider*, CERN-91-03 (1991)
- 5) CERN publication office: *Back to Creation, LHC Project* (1991)
- 6) 近藤敬比古: 日本物理学会誌 46 (1991) 742
- 7) R. Perin: IEEE Trans. Magn, **MAG-27**(1991) 1735
- 8) D. Leroy, R. Perin, G. de Rijk and W. Thomi: IEEE Trans. Magn, **MAG-24** (1988) 1373
- 9) D. Leroy, R. Perin, D. Perini and A. Yamamoto: *Structural Analysis of the LHC 10 T Twin-Aperture Dipole*, Proc. of 11th Int. Conf. on Magn. Technol., Tsukuba (1989) 159, LHC-Note 103
- 10) A. Ijspeert, R. Perin, E. Baynham, P. Clee, R. Combs, J. Wheatley and D. Wills: *Development of a Superconducting Sextupole-Dipole Corrector Magnet*, proc. of 11th Int. Conf. on Magn. Technol., Tsukuba (1989)
- 11) R. Perin, D. Leroy and G. Spigo: IEEE Trans. Magn, **MAG-25**, (1989) 1632, LHC-Note 83
- 12) A. Asner, R. Perin, S. Wegner and F. Zerobin: *First Nb₃Sn 1 m Long Superconducting Dipole Model Magnets for LHC Break the 10 T Field Threshold*, Proc. 11th Int. Conf. on Magn. Technol., Tsukuba (1989) 36, LHC-Note 105
- 13) H.H.J. ten Kate, et al.: *Development of a 10*

- T Nb₃Sn Twin-Aperture Model Dipole Magnet for the CERN LHC*, Proc. 11 th Int. Conf. on Magn. Technol. (1989) 66
- 14) D. Hagedorn, Ph. Lebrun, D. Leroy, A. McInturff, R. Perin and J. Vlogaert: *Design and Construction of a Twin-Aperture Prototype Magnet for the CERN LHC Project*, Proc. 11 th Int. Conf. on Magn. Technol., Tsukuba (1989) 48
 - 15) 渡辺和雄, 能登宏七, 武藤芳雄: 低温工学 27 (1992) 2
 - 16) Ph. Lebrun: Private Communication
 - 17) R. Perin: *Magnet R & D for the CERN LHC*, Proc. of ICFA Workshop on Superconducting Magnet and Cryogenics, BNL (1986) 30
 - 18) T. Shintomi, M. Wake, K. Tsuchiya, M. Kobayashi, T. Mito, H. Hirabayashi, K. Aihara, K. Asano, Y. Hakuraku, F. Suzuki, T. Suzuki, T. Yamagiwa, R. Saito and H. Moriai: IEEE Trans. NS-32, No. 5 (1985) 3719
 - 19) H. Hirabayashi, A. Yamamoto, S. Kawabata, G. Brianti, D. Leroy and R. Perin: Proc. of 1990 Appl. Super. Conf., IEEE Trans. Magn. **MAG-27** (1991) 2004
 - 20) A. Yamamoto, S. Kawabata, H. Yamaoka and H. Hirabayashi: *Development of High Field Superconducting Magnets for Future High Energy Particle Accelerator*, Proc. 7 th US-Japan Workshop on High-Field Superconducting Materials, Wires and Conductors, Fukuoka (1991) 32
 - 21) S. Kawabata, A. Yamamoto, H. Yamaoka and H. Hirabayashi: *Design Study of a Superconducting Dipole Model Magnet for the Large Hadron Collider*, Proc. 8 th Symp. on Accelerator Science and Technology, Wako, (1991)