

## ■ 研究紹介

# LHC 高輝度化アップグレードと KEK での超伝導磁石開発

KEK 超伝導低温工学センター

中本 建志

tatsushi.nakamoto@kek.jp

2015年11月16日

## 1 はじめに

スイス・ジュネーブ郊外にある CERN (欧州原子核研究機構) の LHC (Large Hadron Collider) は、地下約 100 m にある周長約 27 km の旧 LEP (Large Electron Positron collider) トンネルに建設された、世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器である。その最大の特徴は、ビーム偏向磁石として NbTi 超伝導コイルを採用し、液体ヘリウム温度 4.2 K よりもさらに低い超流動ヘリウム冷却による 1.9 K で運転することで、超伝導線材の臨界電流を押し上げ、磁石性能を極限まで発揮することを目指した点である。こうした高磁場化によって、与えられたトンネル周長に対して陽子エネルギーを最大化することができる。27 km の加速器トンネルに定格磁場 8.3 T の 15 m 長主双極超伝導磁石を 1232 台設置し、陽子ビームエネルギーが 7 TeV に到達する仕様となっている。

2008 年 9 月のヘリウム漏洩事故により計画の大幅な遅延があったものの、2010 年から本格的にビーム運転を開始し、重心系エネルギー 7 TeV (陽子エネルギー 3.5 TeV) での実験がスタートした。2012 年までの Run 1 では最終的に重心系エネルギーは 8 TeV にまで向上し、ヒッグス粒子の発見といった大成果をもたらすことができた。その後の 2 年間は、2008 年の事故原因となった主磁石間を電氣的に接続する超伝導バスラインの補修工事など、設計仕様である重心系エネルギー 14 TeV でのビーム衝突実験を可能とするための安全対策工事に当てられた。こうして 2015 年 4 月からビームコミッションが始まり、6 月から重心系エネルギー 13 TeV での実験が再開された。しばらくは、できるだけリスクを避け、安定して実験を進める方針となっており、14 TeV での実験開始はもう少し先かもしれない。現時点の計画では、2023 年まで運転を継続し、積分ルミノシティ 300 fb<sup>-1</sup> を供給することになっている。

以上これまでの LHC の変遷をざっと書いてみると、現在は運転がようやく本格化して、ほぼ所定の性能を発揮しつつある状況であり、「何故、今頃から高輝度化アップグレードのための研究開発？」といった印象を持たれるかもしれない。そこで次章以降に、アップグレード計画の背景や概

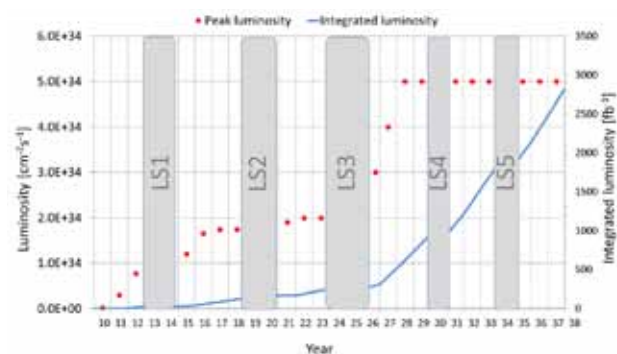


図1 LHCでのピークルミノシティ(左)と積分ルミノシティ(右)の予測[1]。HL-LHCのための大規模な改修は、2024年から始まるLS3(Long Shutdown 3)で計画されている。

要を簡単に紹介したい。その後、KEKで取り組んでいる超伝導磁石の研究開発\*1について報告する。

## 2 LHC 高輝度化アップグレード(HL-LHC)

### 2.1 計画概要

図1に、LHCでの各年毎のピークルミノシティと積分ルミノシティの予測を示す[1]。現在の計画では、LHCは徐々にピークルミノシティを改善しながら2023年頃まで運転を続ける予定になっている。途中、長期運転停止期間(LS2: Long Shutdown 2)にコリメータの部分的増強や入射器を更新し、ピークルミノシティを設計値( $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )の2倍にまで向上させる目標になっている。先に述べたように、現在LHC実験は順調に進んでおり、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超える新しい物理事象の探索を続けている。しかし2020年頃を過ぎると統計精度の改善度合いが鈍化するため、LHCをさらにアップグレードし、飛躍的にルミノシティを

\*1 HL-LHCに向けた超伝導磁石開発への参加者は次のとおりです。

KEK 超伝導低温工学センター 菅野未知央, 榎本瞬, 徐慶金(現 IHEP), 佐々木憲一, 木村誠宏, 岡田竜太郎, 高橋直人, 田中賢一, 山本明(現先端加速器推進部), 荻津透。  
KEK 機械工学センター 川又弘史, 岡田尚起。  
CERN Andrea Musso, Ezio Todesco。

向上させて統計量を増加させたいという強い要求があった。ただ、 $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上のルミノシティでは、コリメータやヘリウム冷凍機の許容能力を超えてしまい、またトンネル内の電源やクエンチ保護システムなどの電子機器類が放射線に耐えられなくなると予測されている。また、2020年を過ぎて積分ルミノシティが  $300 \text{ fb}^{-1}$ に達する頃になると、最終ビーム収束用超伝導磁石システムへの積分吸収線量も最大約  $30 \text{ MGy}$  にまで達し、磁石中の有機材料が劣化して使用できなくなってしまう。このため、同時期にはアップグレード如何に関わらず磁石システムを更新する必要がある。

以上のような背景から、2024年からの長期運転停止期間LS3に大規模な改修を行い、ピークルミノシティ(実際には後述するようにレベリングして)  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、2037年までの積分ルミノシティ  $3000 \text{ fb}^{-1}$ を目指す『LHC高輝度化アップグレード(HL-LHC: High Luminosity LHC)』計画が進められている[1, 2, 3]。元々は2006年のEuropean Strategy for Particle Physicsにおいて、「LHCのポテンシャルを最大限に利用しつつ、将来の高輝度化アップグレードに向けたR&Dを進める」ことが最重要事項として正式に承認されたことが契機となった[4]。2011年からはEUのFP7(欧州第7次研究枠組み計画)のプログラムとして正式に採択され(HiLumi LHC: High Luminosity LHC Design Study)、CERNを中心に15の大学・研究機関が参加して研究開発を進めている[5]。2015年9月には、CERN評議会においてHL-LHC建設予算を含む中期計画が承認されており、現在は「設計研究」から「建設」のためのプロジェクトに移行しつつある。

KEKはCERNとの国際研究協力の枠組みの元、ATLAS実験の高精度化に貢献するという立場から、2000年代から既に加速器アップグレードに関する研究開発を行ってきた。FP7-HiLumi LHCにも最初から正式メンバーとして参加しており、ビーム物理、超伝導磁石、クラブ空洞、ビーム診断の各分野において研究開発を進めている。なお、HL-LHCと関連しながらも別組織として、LHC入射器アップグレード計画(LIU: LHC Injectors Upgrade Project)も進められており[6, 7]、KEKもJ-PARCで実績のあるファインメット加速空洞などの研究協力で大きく貢献している。米国はP5レポートにも述べられているように、HL-LHCに対する研究協力を最重要事項として考えており、DOE傘下の国立研究所(BNL, Fermilab, LBNL, SLAC)を中心としたUS-LARP(LHC Accelerator Research Project)として、高磁場超伝導磁石やクラブ空洞開発などの分野に参加している。詳細については後述するが、HL-LHCでのルミノシティ向上シナリオでは、これら「高磁場超伝導四極磁石」と「クラブ空洞」が成功の鍵を握っている。CERNと密接に協力して、多くの研究予算とリソースを使って強力に研究開発を推進している米国の存在感はとて大きい。

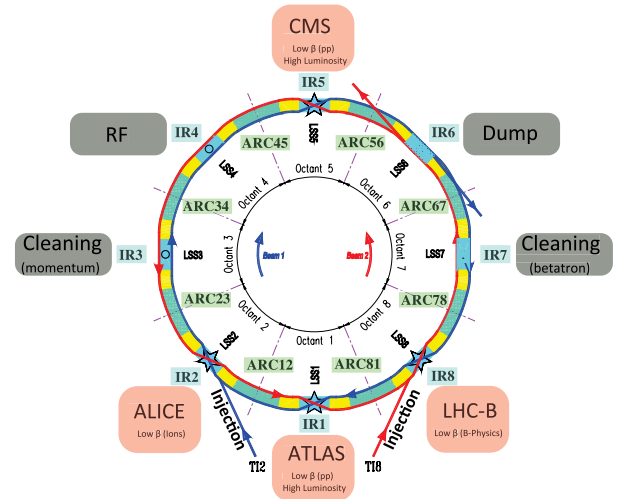


図2 LHCの概略図[8]。HL-LHCでは、アーク部はLHCのまま使用するが、残りの挿入部(IR1-8)では機器のアップグレードや更新、土木工事が必要となる。

## 2.2 アップグレードのシナリオ

図2にLHCの概略図を示す[8]。LHCのビームルミノシティ  $L$  は以下の式で表すことができる。

$$L = \gamma_r \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\epsilon_n \beta^*} R ; R = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_z)^2}{4\epsilon_n \beta^*}} \gamma_r$$

ここで、各パラメーターは以下の通りである。

$\gamma_r$ : ローレンツ因子

$N_b$ : バンチ当り陽子数

$n_b$ : バンチ数

$f_{rev}$ : 1秒当りの周回数(=11.2 kHz)

$\beta^*$ : 衝突点での $\beta$ 関数

$\epsilon_n$ : 横方向規格化エミッタンス

$R$ : 交差角による幾何的損失係数

$\theta_c$ : ビーム交差角

$\sigma_z$ : 縦方向ビームサイズ(R.M.S.)

この式を見ると、ルミノシティを増大させるには、ビーム電流を増強し( $N_b$ ,  $n_b$ を大きく)、衝突点でのビームサイズを絞り( $\epsilon_n$ ,  $\beta^*$ を小さく)、交差角による幾何的損失係数  $R$  をできるだけ大きくするように設計すれば良いことになる。ただ、レイアウト変更は自由ではなく、HL-LHCにおいても、

- ・ リングの大半を占めるアーク部ラティス磁石には手を加えず、現行LHCのまま使用する、
- ・ 測定器との干渉を考慮し、最終ビーム収束四極磁石からビーム衝突点までの距離は基本的に変更しない、という前提で検討が進められた。その結果、HL-LHCではルミノシティの大幅な向上のために次のような設計方針を取っている。

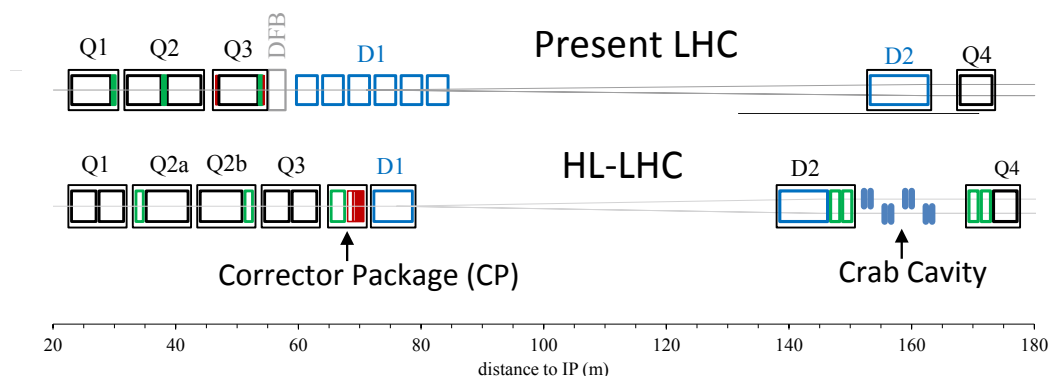


図3 現行 LHC 及び HL-LHC での衝突点挿入部の磁石配置図。横軸は衝突点からの距離を示す。後方のアーク部(図では右側)からビーム再結合双極磁石 D2 までは、対向 2 ビームが 194 mm 離れているため各磁石は双口径となっている。一方 D1 から Q1 までの最終ビーム収束部では、両ビームともに共通するビームパイプを通るため磁石は単口径となっている。HL-LHC では Q1-Q3 が長くなり、またクラブ空洞を新たに設置するため、D1-D2 間距離が短くなっていることが判る。

- 1) HL-LHC の要求に応えるため、LHC 入射器(Linac4, PSB, PS, SPS)の各機器について更新・アップグレードを実施し、ビーム強度とブライトネスを増強する。
- 2) LHC 衝突点でのビームサイズを絞り込むために、 $\beta^*$  を 0.55 m から 0.15 m にまで減少させる。そのため ATLAS と CMS の衝突点周りの挿入部(IR1, IR5, それぞれ長さ約 300 m)には、新たに大口径かつ高磁場の磁石が必要となる。図 3 に現行 LHC と HL-LHC での衝突点挿入部磁石の配置図を示す。
- 3) 挿入部でのビームサイズが大きくなるので、ビーム交差角 $\theta_c$ も大きくせざるを得ない。結果としてそのままでは幾何的損失係数  $R$  を大きく保つことができない。このため、KEKB で実用化されたクラブ空洞技術を陽子加速器として初めて導入し、係数  $R$  を現行 LHC と同程度にまで回復させる。

表 1 に、現在提案されている HL-LHC での主なビームパラメータをまとめる[1, 2]。

以上の方針は立てたものの、現行 LHC には『高ルミノシティ化』に対していくつものボトルネックが存在し、詳細に設計検討した上で、機器のアップグレード及び大規模な施設・設備の更新が必要となる。挿入部磁石については次節で紹介するとして、それ以外の主なものについて以下にまとめる [1, 2, 3]。

- ・ **ルミノシティレベリング**: 単純な高ルミノシティ化では、1 回のビーム交差当りの事象数(パイルアップ)が激増してしまい、測定器の許容能力を超えてしまう。このため HL-LHC では、加速器全体の潜在的なピークルミノシティは  $20 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  を目指しつつ、実際のビーム運転では挿入部の四極磁石などを調節することでルミノシティを  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に平坦化(レベリング)する計画である。図 4 は、レベリング有無でのルミノシティプロファイルの違いを表す[1]。過剰なパイルアップを防ぎつつ、

レベリング無しの場合と比較しても遜色の無い平均ルミノシティが得られる見通しになっている。

- ・ **ATS によるクロマチシティ補正**: HL-LHC では、強力な low- $\beta$  トリプレット超伝導四極磁石によりビームを小さく絞り込むことのデメリットとして、非常に大きなクロマチシティが誘発される。従来のビーム光学を元にした検討では、既存のアーク部ラティス六極磁石では十分に補正できないという予測だった。この問題を解決するため、衝突点を挟んで隣り合う 2 つのアーク部(例えば ATLAS 衝突点では ARC 81 と ARC 12)の $\beta$ 関数を意図的に増大させ、ラティス六極磁石のクロマチシティ補正効果を強化する新しいアイデア(ATS: Achromatic Telescopic Squeezing)が提案された[8]。実際に LHC での

表 1 HL-LHC でのビームパラメータ[1, 2]

パラメータ	Nominal LHC	HL-LHC 25ns
陽子エネルギー (TeV)	7	7
バンチ当たり陽子数 $N_b$ ( $10^{11}$ )	1.15	2.2
バンチ数 $n_b$	2808	2748
ビーム電流 (A)	0.58	1.09
交差角 $\theta_c$ ( $\mu\text{rad}$ )	285	590
衝突点ベータ関数 $\beta^*$ (m)	0.55	0.15
規格化エミッタンス $\epsilon_n$ ( $\mu\text{m}$ )	3.75	2.50
縦方向エミッタンス $\epsilon_L$ (eVs)	2.50	2.50
バンチ長 R.M.S. $\sigma_s$ (m)	0.0755	0.0755
幾何的損失係数 (クラブ空洞無し)	0.836	0.305
幾何的損失係数 (クラブ空洞有り)	(0.981)	0.829
クラブ空洞無しでのピークルミノシティ ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	1.0	7.18
クラブ空洞有りでのピークルミノシティ ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	(1.18)	19.54
レベリングしたルミノシティ ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	-	5.0
交差当り事象数 (パイルアップ)	27	138 <sup>1</sup>
パイルアップ密度 (/mm)	0.21	1.25 <sup>1</sup>
積分ルミノシティ ( $\text{fb}^{-1}/\text{year}$ )	45	260

1 クラブ空洞有り、かつレベリング時

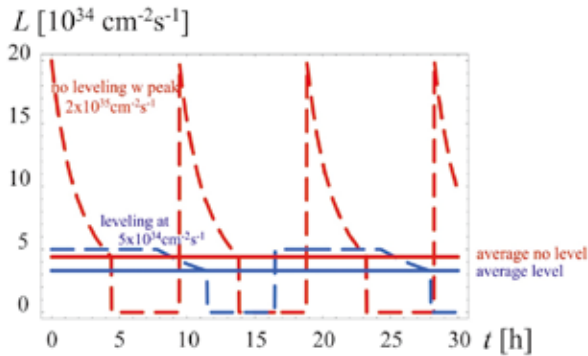


図4 HL-LHCにおけるレベリング有無によるルミノシティプロフィール[1]。レベリングして過剰なパイルアップを抑えつつ、実験ラン以外も含めた平均ルミノシティを最大化するように時間配分を調整することで、レベリング無しの場合と同程度の積分ルミノシティを得られる。

ビームスタディでも効果は実証されており、HL-LHCでのビーム光学のベースラインとして検討が続いている。

- R2E 対策と超伝導リンク：** 積分ルミノシティを増大させるには、実験ランタイムを如何に最大化し、逆に故障等による運転不可時間を最小化することが必須となる。最も懸念されているのはトンネル内の電子機器で、これまでも放射線による誤作動が原因でLHC運転に支障が出ている。HL-LHCでは、高ルミノシティ化によりますます放射線起因のトラブルが増加することが予測されており、R2E (Radiation to Electronics)プロジェクトとして、放射線耐性の高いボードへの交換などの対策を進めている。ただし、特に放射線レベルの高い場所に設置されている電源については遠隔(別トンネル又は地上部)へ移設せざるを得ない。移設した電源と加速器トンネルの超伝導磁石を結ぶため、通常の銅ケーブルの代わりに「超伝導リンク」と呼ばれる、長さ300~500 m、電流容量160 kAにも達する超伝導バスラインをPoint 1, 5, 7に新たに建設することを計画している。世界で初めてのMgB<sub>2</sub>超伝導導体の大規模工学応用となる予定であり、導体開発やプロトタイプングが進められている。
- コリメータアップグレードと11T双極磁石開発：** 陽子ビームエネルギーが700 MJ以上にもなるLHCにおいて、高品質のビームを維持し、ビームロス起因の超伝導磁石のクエンチを防ぐコリメータシステムは、実験ランタイムを最大化するためにも重要な機器といえる。LHCの主なコリメータは、IR3, 7と各衝突点挿入部に設置されているが、HL-LHCでのビーム電流増加に対応できるようなコリメータアップグレードのための研究開発が進められている。またHL-LHCでは新たにDispersion Suppressor領域(挿入部と隣接する、アーク部の最終端部)に新規コリメータを設置する必要がある。コリメータ

設置に必要な空間(~2.5 m)を確保するため、既設の8.3 T NbTi超伝導双極磁石を、長さが短くて済む11 T Nb<sub>3</sub>Sn磁石に入れ替えることを計画している。low-βトリプレット超伝導四極磁石と同様に、実現すればNb<sub>3</sub>Sn超伝導コイルの初めての加速器応用となる。このための磁石開発がCERNを中心に急ピッチで進められている [9]。

- ヘリウム冷凍プラントの新設とサービストンネル工事：** ルミノシティは衝突点からの放射線デブリ量と比例するため、挿入部超伝導磁石ヘリウム冷却系への熱負荷と強く相関することになる。現在のヘリウム冷凍システム(プラント)は基本的にLHCの各アーク部に対応するよう8カ所に設置されているが、点在する挿入部超伝導システム(磁石または高周波加速空洞)はどれかのアーク部冷凍システムにぶら下がった形で冷却されている。このため、現行LHCの冷却運転ではほとんど余裕がなく、さらなる高ルミノシティ化のためには、ヘリウム冷凍機の増設が必要となる。HL-LHCでは、IR1とIR5には、それぞれ挿入部磁石専用ヘリウム冷凍プラント(1.8 Kでの冷凍能力が3 kW!)を新設する。コールドボックスは地下部に設置されるため、地下空洞(cavern)やサービストンネル、地上部と繋ぐ新たなシャフトなどの大規模な土木工事を伴うことになる。またIR4の超伝導加速空洞用挿入部についても専用のヘリウム冷凍プラント(4.5 Kでの冷凍能力6 kW)が新設される。

以上概観したように(紹介できなかったものも含めて)、HL-LHCに向けたR&Dや設計検討、施設増強は多岐に渡っており、またチャレンジングな開発がいくつも含まれている。実際に改修工事を行うのは、LHCトンネルの1.2 km以上にも及ぶ。CERN中期計画でHL-LHC建設(2015年~2026年)の予算合計は、約10.4億スイスフランとなっており、その規模が伺える。

## 2.3 HL-LHC 衝突点挿入部用磁石システム

前節で述べたようにHL-LHCでのルミノシティ増強にとって、衝突点挿入部(IR1, 5)磁石は非常に重要な役割を担う。HL-LHCでの衝突点挿入部の各磁石の断面模式図と主要なパラメータをそれぞれ図5と表2に示す。

なお、Q1-Q3以外の超伝導磁石には、必要となる磁場性能を考慮した上で、LHC向けに既に開発されていて技術的に成熟しているNbTi超伝導線材を採用している。このお陰で迅速な磁石開発が可能となる。Nb<sub>3</sub>Sn線材による高磁場化についても検討されたが、恩恵よりも開発リスクとコストの増加及びスケジュール遅延による欠点のほうが大きいと判断されたため、採用されなかった。

### 2.3.1 low-βトリプレット超伝導四極磁石：Q1, Q2a/b, Q3

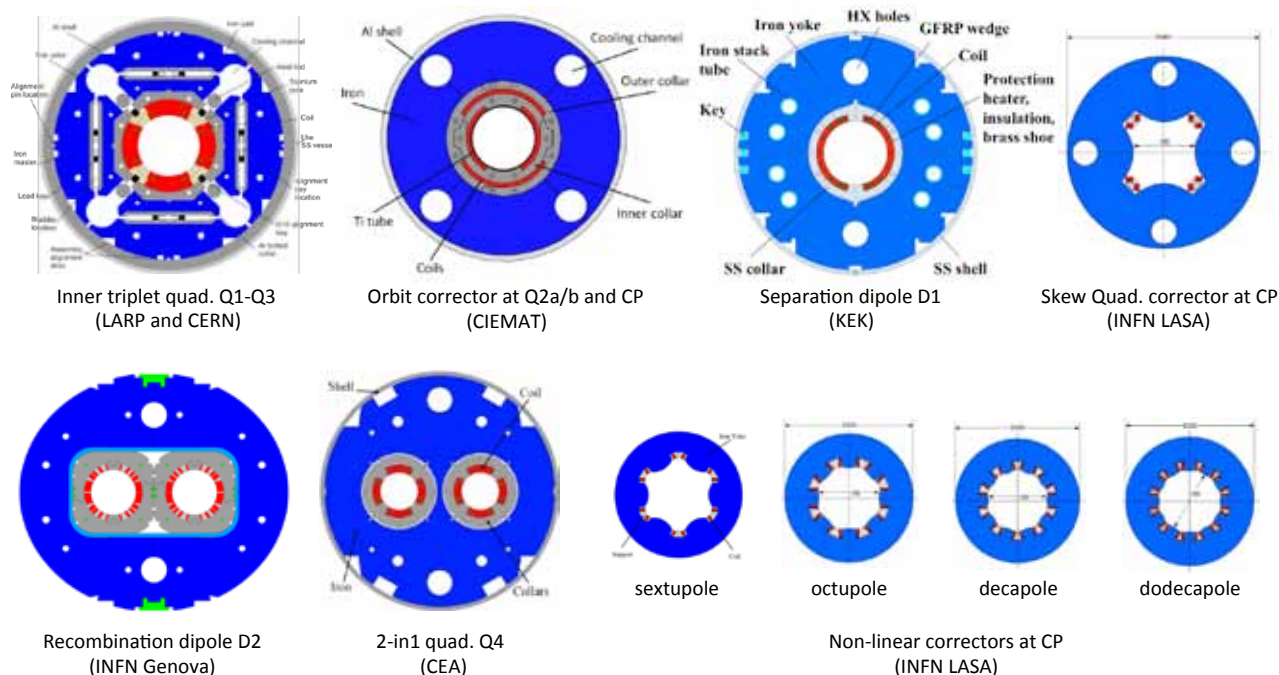


図 5 HL-LHC 衝突点挿入部(IR1, IR5)用超伝導磁石の直線部断面模式図。KEK はビーム分離用双極磁石 D1 の開発を担当している。CP は Corrector Package の略。

衝突用最終ビーム収束の役割はlow- $\beta$ トリプレット超伝導四極磁石(Q1-Q3)が担う。 $\beta^*$ を小さくするトレードオフとして、挿入部における $\beta$ は大きくなり、ビームサイズが今よりも大きくなる。このために、衝突点用磁石(Q1 から D1 まで)の口径は、現行の 70 mm から 150 mm にまで拡張する必要がある。四極磁石には、加速器応用としては初めて Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材が採用され、従来の NbTi よりも約 50 %の高磁場化が図られている。これにより、コイル口径が現在の倍以上になったにも関わらず、1.9 K 冷却下において、ロードライン上での負荷率が 77%(コイルピーク磁場で 12.1 T に相当)で定格磁場勾配 140 T/m を発生することができる。このお陰で、トリプレット全体の長さも(LHC よりも約 10 m 延びるもの)約 35 m に抑えることができる。

NbTi に置き換わる、10 T を超える高磁場化を目指した加速器用 Nb<sub>3</sub>Sn 磁石の開発は、既に 2000 年代始めには LBNL や Fermilab で本格的に行われていた。US-LARP の枠組みとしても 10 年以上に渡り 1 億ドル以上の開発費を投じている。このような背景から low- $\beta$ トリプレット Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導四極磁石の研究開発は US-LARP が先導する形で進められてきた。CERN も LHC 建設が完了してから Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石開発に着手し、US-LARP からの技術移転を受けつつ、人的、設備的な準備を整えながら CERN 自身による R&D を進めてきた。

low- $\beta$ トリプレット超伝導四極磁石自体の名称は MQXF<sup>\*2</sup> と呼ばれ、Q1 及び Q3 の製作を US-LARP が担当し、CERN が Q2a 及び Q2b を受け持つことになっているが、設計開発は全て共同で行い、治具等も全く同じものを使用することになっている。2015 年 11 月の時点で、最初の 1m 長モデル磁石が完成し、初めての冷却試験を予定している。

紙面の都合上、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石開発の詳細を説明することはできないが、簡単に概略(何がそんなに難しいのか)を述べると以下ようになる。

- NbTi 超伝導体が合金で延性であるのに対し、Nb<sub>3</sub>Sn は化合物であり機械的に非常に脆い。また、応力や機械歪みに依存して超伝導性能が低下することが知られている。これは高磁場化(=高電磁力化)を目指す超伝導線としては、『嬉しくない』性質であり、磁石設計・製作に非常に大きな制限を与える。
- 熱処理後の Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線ではコイル巻線による機械歪みに耐えられない。このため、先に巻線したコイル全体を熱処理することで、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導相を生成する。加熱炉での熱処理は最高温度 650 °C で合計 1 週間にも及ぶ。有機系絶縁材料は使用できず、脆いガラス繊維による絶

\*2 LHC では、次のように加速器中のシステム(ここでは磁石)を識別する。最初の M は磁石(Magnet)を意味し、次は磁石の種類(B: 偏向用双極, Q: 収束用四極, CS: 補正用六極, CSS: 補正用スキュー六極, など), その次は設置場所(何も無ければアーク部の主磁石, X: 最終ビーム収束部, など), 最後はバージョンや磁場長の違い、常伝導磁石を意味する文字が入る。

表 2 HL-LHC 衝突点挿入部(IR1, IR5)用超伝導磁石の主なパラメーター

	Inner Triplet Q1, Q3/ Q2a, b MQXF	Short Orbit Corr. MCBXFB	Long Orbit Corr. MCBXFA	Separation Dipole D1 MBXF	Re-combination Dipole D2 MBRD	2-in-1 Quad. Q4 MBYY	Skew Quad Corr. MCQSXF	Non-linear Corr. MCSXF/ MCSSXF	Non-linear Corr. MCOXF/ MCOSXF	Non-linear Corr. MCDXF/ MCDSXF	Non-linear Corr. MCTXF/ MCTSXF
Order, n	2	1	1	1	1	2	2	3	4	5	6
Aperture (mm)	150	150	150	150	105	90	150	150	150	150	150
# of Apertures	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1
Field (T or T/m <sup>n-1</sup> )	140	2.1	2.1	5.58	4.50	115	25	11	3690	50600	640000/ 613000
Length (m)	4.00x2/ 6.80	1.20	2.20	6.27	7.78	3.83	0.84	0.12	0.099	0.107	0.449/ 0.102
Coil Peak (T)	12.1	4.3	3.5	6.7	5.1	6.0	3.0	2.3	2.4	2.34	2.0
Stored Energy (MJ)	5.28x2/ 8.98	0.12	0.22	2.15	2.21	0.73	24 kJ	1.2 kJ	1.4 kJ	1.4 kJ	4.34/ 0.9 kJ
Superconductor	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi	NbTi

縁となるため、ターン間ショートや地絡が発生することが多々ある。また超伝導相の生成に伴い、熱処理前後で素線が異方的に寸法変化し、ケーブル断面積が数%増加してしまう(ちなみに長手方向には縮むため、コイルマンドレルにはこのための配慮も必要になる)。熱処理後のコイルは脆いため、機械強度を与えるために樹脂含浸する。

- 超伝導磁石では、クエンチ発生時に安全に磁気エネルギーを散逸させて局所的な導体焼損を絶対に避ける必要がある。しかし、大口径化、高磁場化により、定格励磁時の磁気エネルギーは磁石 1 m 当り 1.3 MJ に達している(D1 の 4 倍に相当)。シミュレーションによると、クエンチヒーターによるクエンチ保護により、コイルピーク温度はぎりぎり 350 K 以下であることを確認しているが、ほとんどマージンが無い。このため様々な角度から検討が続いている。
- 12-15 T もの高磁場領域でも高い臨界電流密度  $J_c$  を示す Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材を開発、製造することは技術的に全く自明ではない。HL-LHC で求められる  $J_c$ (銅部以外)は 15 T で 1340 A/mm<sup>2</sup> にもなり、通常のブロンズ法線材の 2 倍以上にもなる。同時に、磁化電流による誤差磁場の影響を抑えるために素線のサブエレメント径を 50  $\mu$ m 以下にすることと、熱的不安定性やクエンチ保護の観点から安定化材(銅)の RRR 残留抵抗比が 150 以上であることが厳しく要求される。研究支援も含め、線材メーカーと強力でタッグを組んだ研究開発が必要であることが判る。また素線のケーブル化も重要な開発要素となる。磁石開発を進める上でも、超伝導線材評価を専門に担当する材料物性の研究者が必要不可欠となる。

他にも加熱炉や含浸用真空容器など大型設備が必要不可欠であるため、加速器向け Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石開発はとてハドルが高い。

### 2.3.2 ビーム分離用双極磁石: D1

ビーム分離用双極磁石 D1 の研究開発は、KEK が担当している。図 3 に示すように、low- $\beta$ トリプレット超伝導四極磁石の延長に加え、D2 と Q4 との間にクラブ空洞のためのスペースを新たに確保するため、HL-LHC での D1-D2 間距離は今よりも 15 m 短い 70 m になってしまう。このために D1 と D2 には強いキック力が必要となり、磁場長を 26 Tm から 35 Tm に増強させることになった。D1 については、現行 LHC の常伝導磁石(定格磁場 1.28 T, 全長約 20 m, 磁極間ギャップ 63 mm)を NbTi 超伝導磁石(5.6 T, 7 m, コイル口径 150 mm)にアップグレードする。なお、少しでも D1-D2 間距離を長く保つために、最終ビーム収束磁石システムへの電流とヘリウム供給の役割を担っていたサービスモジュール(cryogenic electrical distribution feedbox: DFB)は廃止となったが、このことで D1 内部を Q1-Q3 及び補正磁石の全ての超伝導バスケーブルが通ることになってしまった。

D1 磁石の研究開発については 3 章で詳細を紹介する。

### 2.3.3 ビーム再結合用双極磁石 D2 及びマッチングセクション用四極磁石: Q4, Q5

ビームサイズ増大の影響はマッチングセクションにも及び、D2 から Q5 までのコイル口径を拡大する必要がある。挿入部の全長は決まっている(アーク部開始位置は変更できない!)ため、D2 だけでなく、マッチング用四極磁石(Q4, Q5)も高磁場化することで機械長増加を抑えることになる。

これらの磁石に共通している難しさは、2 コイルの中心間隔が 188-194 mm の双口径磁石でありつつ、高磁場化に対応しなければいけない点である。超伝導性能(臨界電流)を向上させるため、マッチングセクションの冷凍システムを最終収束部と一体化させ、運転温度を 4.5 K から 1.9 K へ変更することになっている。しかし、高磁場化による鉄の飽和の影響が大きくなる点や、2 コイル間のクロストークが顕著

になる点など、技術的に見てとても難しい磁石といえる。なお Q4 の研究開発は、CEA-Saclay が担当している。

D2 は、2つのコイルの磁場の向きが同じになるため、フラックスリターンが左右の鉄ヨークを通ることになり、各コイルの磁場には極めて大きい左右非対称性成分が生じる。この影響を打ち消すため、D2 の双極コイルは意図的に左右非対称となるように設計されている。D2 の設計は INFN-Genova が担当している。

### 2.3.4 補正磁石

最終ビーム収束部には、主磁石の他に、ビーム軌道修正(鉛直・水平)用補正磁石(図 5 中の Orbit corrector)やスクュー四極( $a_2$ ) 補正磁石、六極から十二極( $b_3, b_4, b_5, b_6, a_3, a_4, a_5, a_6$ ) までの補正磁石(図 5 中の Non-linear correctors)が設置される。

CIEMAT が開発しているビーム軌道修正用補正磁石は、限られたスペースに設置するため、鉛直・水平それぞれのコイルを同心上に配置する、いわゆるネスト型になっている。両コイルを定格励磁すると非常に大きなトルクが発生するため、機構構造設計がとても難しい。

スクュー四極及び Non-linear 補正磁石は、INFN-LASA が開発を担当している。図 5 の他の磁石のように導体の配置(電流分布)で磁場を生成するのではなく、主に鉄の磁極形状で磁場を生成する『Superferric Magnet』と呼ばれる。

### 2.3.5 ビームシールド

高ルミノシティ化の代償として、挿入部磁石では、衝突点からの放射線デブリ由来の二次放射線量(粒子フルエンス、吸収線量)とそれに起因する入熱量が増大する。前者は超伝導コイルを成形する有機系樹脂や超伝導導体の銅安定化材を劣化させるため磁石の寿命を決定する。また後者は単純に冷凍負荷になるだけでなく、超伝導コイル内部に局所的なホットスポットを発生させる。FLUKA や MARS による



図 6 HL-LHC におけるビームパイプとシールド断面図。左は Q1, 右は Q2-D1 に挿入される。外側が SUS316LN 製ビームパイプで、外周面が超伝導コイル内周面と接することになる。ビームパイプとビームスクリーン(正八角形)の間にあり、メディアンプレーンをカバーしているのがタングステン製シールド。スクリーンとシールドへの入熱は、4本の銅管を通るヘリウムガス(40-60 K)で冷却される。

シミュレーションでは、ビームパイプに何もシールドが無い場合、low- $\beta$ トリプレット Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導コイルへの積分吸収線量(@目標積分ルミノシティ 3000 fb<sup>-1</sup>)とピーク入熱量(@設計ルミノシティ  $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )がそれぞれ 200 MGy 及び 20 mW/cm<sup>3</sup>にも達することが予測された。この場合、200 MGy もの甚大な放射線に有機系材料は耐えられないため、目標の 3000 fb<sup>-1</sup>に到達する遥か前に磁石を交換する必要がある。また局所的なヘリウム温度はλ点(2.17 K)を優に超えてしまい、もはや超流動ヘリウムによる高い除熱性能が期待できない。この問題を解決するために、Q1 から D1 については、ビームパイプ(SUS316LN)とビームスクリーンとの隙間にタングステン製シールド(図 6)を挿入することが提案されている。シミュレーション結果によるとシールドの効果は絶大で、積分吸収線量とピーク入熱量をそれぞれ 40 MGy 及び 4 mW/cm<sup>3</sup>にまで低減させることに成功している。最終ビーム収束部(Q1 から D1)全体に 1200 W の入熱が予想されているが、その半分はビームシールドとビームスクリーンへの熱負荷となり、残り半分(600 W)は 1.9 K への熱負荷となる。

### 2.3.6 除熱性能

超伝導コイルの温度上昇を防ぐため、放射線入熱は超流動ヘリウムにより速やかに除熱される必要がある。超流動ヘリウム熱交換器をできるだけ熱源に近づけるため、直接磁石内部に配置する設計になっている(図 5 中で、磁石に 4 つないしは 2 つの孔が空いているのは熱交換器用)。また超伝導コイルから熱交換器に至る冷却経路は、十分なコンダクタンスを得るために一定の割合で空隙であることが求められる。例えば D1 の場合、コイルを囲むステンレスカラーは 96%、鉄ヨークも 98% の占有率となることが求められるため、積層板集合体の厚さを調整することになる。しかし、磁石の磁場設計や機械構造設計に対して大きな制約となる。

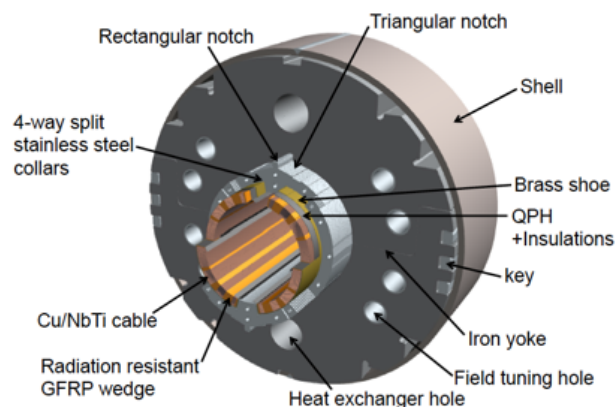


図 7 HL-LHC D1 向け MBXF 磁石の断面模式図。

### 3 KEK での D1 向け超伝導磁石開発[10,11]

#### 3.1 研究開発の経緯

KEK での LHC アップグレードに向けた研究開発は 2000 年代始め(つまり KEK が現行 LHC 用 low- $\beta$  トリプレット超伝導四極磁石 MQXA の開発・建設を行っていたのとほぼ同時期)に遡る。当初は、最終ビーム収束用四極磁石の高磁場化に向けて、物質・材料研究機構(NIMS)と共同で Nb<sub>3</sub>Al 超伝導線材の加速器応用に向けた研究開発を進めていた。Nb<sub>3</sub>Al は応力歪み下においても超伝導性能が低下しにくいという、Nb<sub>3</sub>Sn よりも優れた特性を有していたが、高 J<sub>c</sub>(臨界電流密度)化と長尺化に難点があった。結局 2011 年に Nb<sub>3</sub>Al を HL-LHC 向け超伝導磁石へ採用することを諦め、NbTi 超伝導磁石開発による貢献に集中する判断をした。

2.1 でも述べたように、2011 年から FP-7 HiLumi LHC 設計研究へ参加し、ビーム分離用双極磁石 D1 の設計を開始した。ビーム光学設計や放射線対策からの要請で仕様(特にコイル口径)がたびたび変更され、最終的に 2013 年 5 月に、

- 磁場長 35 Tm
- コイル口径 150 mm

の仕様で最終決定された。2014 年秋のテストコイル試作結果を踏まえ、設計を一部変更し、現在 2m 長モデル磁石 1 号機を所内開発している。

#### 3.2 D1 向け MBXF 磁石の概要と設計方針

D1 に設置されるビーム分離用磁石の名称は、"MBXF"と呼ばれる。MBXF を設計するに当たりいくつか制約があった。KEK で実機の性能評価試験を行うことを考えると、縦型試験用クライオスタットのスペースから MBXF の機械長は 7 m 以下に抑える必要があった。したがって直線部の定格磁場を 5-6 T 程度に設定する方針となった。しかし LHC トンネル内の輸送用通路のサイズを考えると、現行 LHC 用クライオスタットの外径以上にはできず、格納される磁石の外径も現状と同じ 570 mm 程度に収めることが求められた。大口径 150 mm に 6 T 級の双極磁場を発生させることを考えると、フラックスリターンのための鉄ヨークの幅が不足し、漏れ磁場の影響が心配される。また鉄ヨークから超伝導コイルまでの距離を短くせざるを得ないため、局所的な鉄の磁化飽和による相当量の誤差磁場も予想された。従って鉄の飽和や漏れ磁場を十分考慮した電磁設計が必要だった。また放射線や除熱の観点からは、磁石全体の入熱量 135 W、超伝導コイルへのピーク入熱 2 mW/cm<sup>3</sup>、3000 fb<sup>-1</sup> に相当する吸収線量 25 MGy が設計値として与えられた。

以上を考慮して、次のような設計方針を立てた。

- ・ 超流動ヘリウム冷却による 1.9 K において、ロードライン上 75 %程度で運転する。
- ・ NbTi 超伝導ケーブル単層コイルとすることで、鉄ヨー

表 3 HL-LHC D1 向け MBXF 磁石の主要設計パラメーター。

Design parameters	2 m model	Production
General		
Field integral	9.8 T·m	35 T·m
Coil aperture	150 mm	
Nominal dipole field	5.57 T	
Coil peak field	6.44 T at center 6.69 T at coil end	
Load-line ratio	75.4 % at center 76.6 % at coil end	
Field Quality	< 10 <sup>-4</sup> w.r.t the main field	
Nominal current	12.0 kA	
Operation temperature	1.9 K	
Magnetic length	1.73 m	6.27 m
Stored energy	340 kJ/m	
Differential Inductance	4.0 mH/m	
Number of coil layer	1	
Number of turns in quadrant	44 (4+8+13+19)	
Coil mechanical length	2.00 m	6.57 m
Magnet mechanical length	2.15 m	6.72 m
Cold mass weight	3.8 tons	12 tons
Lorenz force per quater $\Sigma F_x / \Sigma F_y$	1.53 / -0.64 MN/m	
Heat load	135 W in total, 2 mW/cm <sup>3</sup> at local peak	
Radiation dose	25 MGy	
Superconducting Cable		
Superconductor	Nb-Ti	
Cable type	LHC MB outer cable	
Strand diameter	0.825 mm	
Coating	Sn5wt%Ag	
Copper to SC ratio	1.95	
Filament diameter	6 $\mu$ m	
Number of filament	6500	
RRR	> 150	
Critical current (9 T, 1.9 K)	> 380 A	
Number of strand	36	
Cable bare width	15.1 mm	
Cable bare mid-thickness	1.480 mm	
Keystone angle	0.9°	
Transposition pitch	100 mm	
Insulation		
1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> layer	APICAL (0.05 mm thick, 11 mm wide), 1/2 overwrap	
3 <sup>rd</sup> layer	PIXEO (0.069 mm thick, 9 mm wide), adhesive, 2 mm gap wrap	

ク幅を最大化できる。またコイル内径面のみからの冷却で効果的に除熱できる。

- ・ NbTi 超伝導ケーブルには、LHC アーク部主双極磁石に使用されたケーブル及び自己融着性ポリイミドテープを採用する。
- ・ カラーの幅を最小化し、鉄の量をできるだけ増やすため、MQXA でも採用した、鉄ヨークをキー留めする方式を採用する。
- ・ 鉄ヨークの外径を 550 mm とすることで、KEK で開発した J-PARC ニュートリノビームライン用超伝導磁石(SCFM)の製作治具を再利用する。



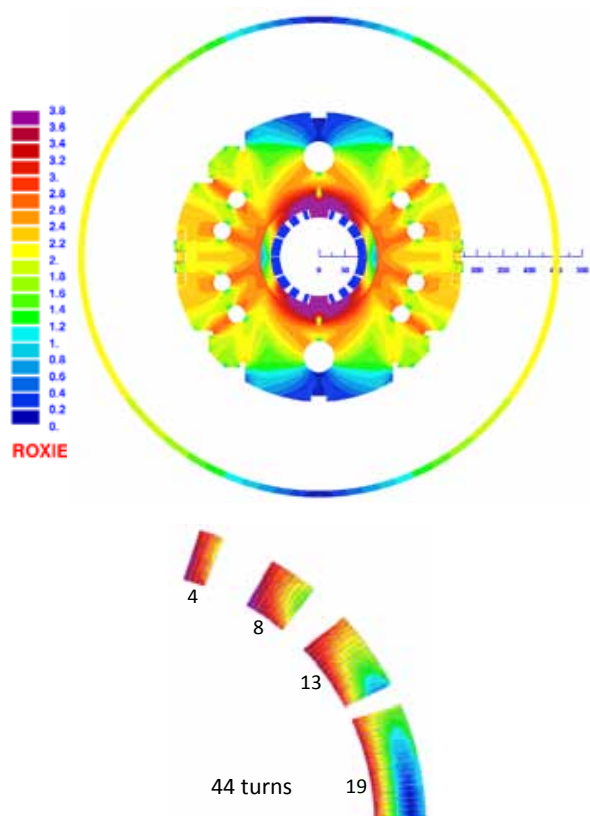


図8 ROXIEによるMBXF磁石の2D磁場計算。上はクライオスタット(真空容器)まで含めた磁石中の磁場分布, 下は超伝導コイル内での磁場分布を示す。

- ・ 新たに耐放射線 GFRP(ガラス繊維強化プラスチック)を開発し, 超伝導コイル部に用いる。

図7にD1向けMBXF磁石の断面模式図を示す。また主要な設計パラメータを表3にまとめる。1.9 K冷却において, 定格電流12 kAで5.57 Tの双極磁場を発生する。磁場は下がったものの, 大口径であるためMBXF実機の磁気エネルギー(約2.1 MJ)はMQXAとほぼ等しい。

### 3.3 電磁設計

ROXIEを用いてMBXFの電磁設計を行った。まず2D計算を行い超伝導ケーブル配置と鉄ヨークの形状を最適化した。最終的に得られた2Dモデルとその計算結果を図8に示す。4つのコイルブロックに, (頂上の)磁極側から4, 8, 13, 19の合計44ターンが巻き線される。鉄ヨークの内周の最上部と最下部には, ステンレスカラーを位置決めするためのテーパと長方形ノッチを設けてある。また鉄ヨーク内部には, 超流動ヘリウム熱交換器用孔( $\phi 60$  mm)が2カ所と磁場調節用孔( $\phi 40$  mm)が8カ所ある。漏れ磁場の影響が無視できないため, クライオスタットも計算モデルに含まれる。ケーブルや孔の位置を変えて反復計算を行い, 鉄の飽和の影響を抑えつつ, 定格時に最も多極成分が小さくなる位置を求めた。なお鉄ヨークの体積占有率は98%とし

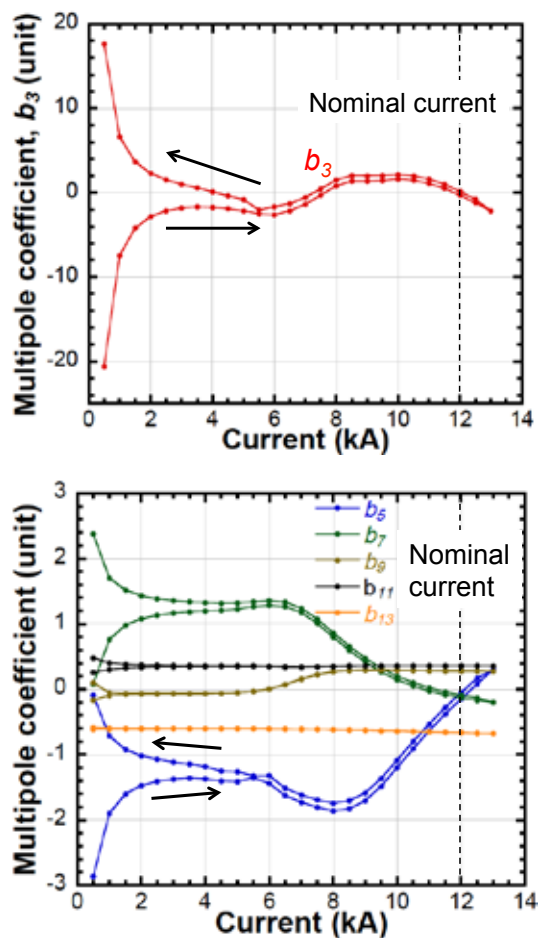


図9 ROXIE 2Dモデルで計算したMBXF磁石多極成分の電流依存性。定格電流で各多極成分が最小となる様子が判る。行き帰りで結果が異なるのは, NbTiフィラメント( $\phi 6$   $\mu$ m)の磁化電流の影響。

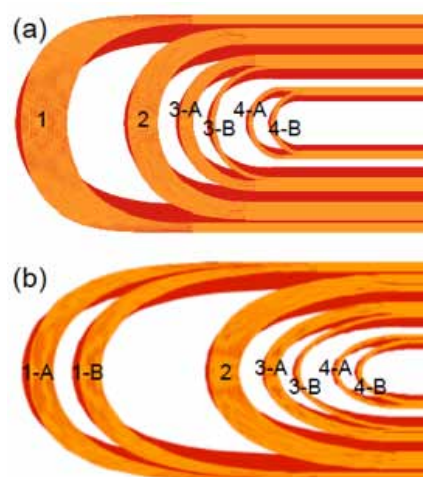


図10 上部から見たコイルエンド(リターンエンド)形状。(a)はテストコイル試作時の設計, (b)は2mモデル磁石1号機向けの最終バージョン。

ている。図9に多極成分の電流依存性を示す。ここで多極成分は以下のように定義される。

表4 ROXIE 3Dモデルで計算したMBXF磁石の定格通電時の多極成分の積分磁場。図10(b)のコイルエンドに相当。

	production magnet	2 m model
$\int B_1(I_{nom}, z) dz$	35.4 Tm	9.8 Tm
$\bar{b}_1$	10000	10000
$\bar{b}_3$	0.17	-2.38
$\bar{b}_5$	0.72	2.06
$\bar{b}_7$	-0.72	-2.60
$\bar{b}_9$	-0.44	-2.22
$\bar{b}_{11}$	0.03	-0.84
$\bar{b}_{13}$	-0.72	-0.86
$\bar{b}_{15}$	-1.09	-1.01
$\bar{b}_{17}$	-0.74	-0.60
$\bar{b}_{19}$	0.38	0.33
$\bar{a}_1$	-2.25	-7.85
$\bar{a}_3$	1.15	4.04

$$B_y + iB_x = 10^{-4} B_1 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + ia_n) \left( \frac{x + iy}{R_{ref}} \right)^{n-1}$$

参照半径  $R_{ref}$  は 50 mm である。鉄ヨーク孔を最適化する以前は、鉄の飽和の影響のため  $b_3$  で約 20 unit のドリフトが見られたが、最適化後は変動を充分許容できる程度まで抑制することに成功した。

直線部二次元断面を決定後、3D 磁場計算を行いコイルエンド形状を最適化した。コイルエンド形状を図10に示す。7m 長実機磁石の全長に渡って積分した各多極成分が最小となるようにエンド部のターン開始場所(直線部の終点位置)を調整した。 $b_3$  の積分磁場を大きく調整するためにブロック1と2の間隔を広げることになった。最終的に得られた定格時の多極成分の積分磁場を表4にまとめる。ここで各多極成分は以下のように定義している。

$$\bar{b}_n = 10^4 \frac{\int B_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz}, \quad \bar{a}_n = 10^4 \frac{\int A_n(I_{nom}, z) dz}{\int B_1(I_{nom}, z) dz}$$

7m長の実機磁石では、コイルエンドまで含めた磁石全体で、 $b_{15}$ を除く全ての Allowed ノーマル成分を 1 unit 以下に抑えることができている。ただし 2m モデル磁石では、ある程度の多極磁場成分が残っている。これは 7m 長実機磁石全体で最適化したコイル端部形状となっているためである。なおスキュー成分はリード側エンド部の左右非対称性から生じている。コイルエンド形状については、図10(a)に示すように、テストコイル試作の結果、コイルエンドのケーブルターンの曲率が総じて急であり、等周条件を満たすためにケーブルに余計な歪みが生じていることが判った。このため全体的に曲率を大きくして、緩やかに巻き線できるよう改善した。またブロック1についてはターン数が19と多いために最終ケーブル形状を正確に予測できず、エンドス

パーサーと大きな隙間が生じてしまった。このためブロックを2分割して、エンドスパーサー形状の改善を施した。その結果、図10(b)を見ても判るように、コイルエンドが長くなり、直線部が短くなっている様子が判る。なお、コイルエンドを延長した副産物で、コイルピーク磁場が低減でき、ロードラインを76.6%にまで下げることができた。

### 3.4 機械構造設計

図7に示されるように、磁石は主に超伝導コイルとステンレスカラー、鉄ヨーク、シェルで構成される。上下2つの単層 NbTi 超伝導コイルは、対地絶縁シートを挟んだ状態で4組のステンレスカラースペーサーにより周囲から固定される。このときの予備圧縮応力は数 MPa 程度に留まる。次にカラーリングしたコイルを上下2組の鉄ヨークで挟み、油圧プレスで押さえ込み左右3つずつあるスロットへキーを挿入して励磁に必要な予備応力を与える。構造体としてはヘリウム圧力容器となるステンレス製シェルを最外殻に溶接することで完成する。組み立てから冷却、励磁に至る各過程に対し ANSYS による有限要素法解析を行った。そ

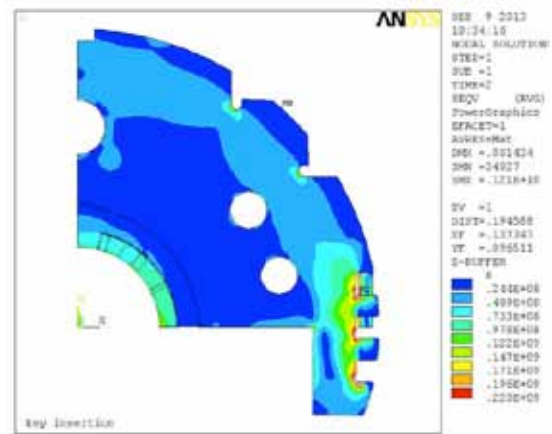


図11 ANSYSによる鉄ヨークをキー留めした際の応力分布の計算結果。

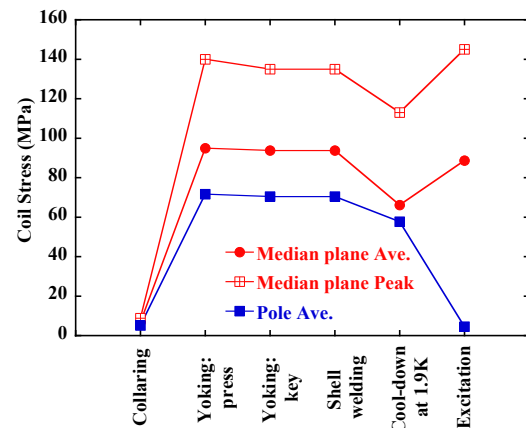


図12 ANSYSによる各過程での超伝導コイルへの周方向圧縮応力の計算結果。

の一例として、図 11 に鉄ヨークをキー留めする際の磁石内部の応力分布を示す。超伝導コイルを除く部品のうち、キー留めの際にスロット部に最も高い応力(220 MPa)が発生するが、降伏点以下に収まることを確認している。その他の過程では特に問題になるような応力集中は見られなかった。各過程で超伝導コイルの磁極(Pole)側ターンと水平面(Median plane)側ターンに掛かる応力を図 12 に示す。組み立て後、1.9K までの冷却で超伝導コイルの熱収縮により応力が若干下がる。励磁の際はコイル自体が磁極方向から電磁力で外側に押されるため、カラーからの圧縮応力が低下する様子が判る(反対に水平面側では各ターンの電磁力が蓄積するため圧縮荷重が増加する)。計算では、定格の 110 % まで励磁した場合でも磁極側ターンに圧縮応力が残るように初期コイルサイズを調整している。この結果、磁石組み立て時にコイルには 70 MPa の予備圧縮応力を与えれば良いことが判った。この結果を踏まえ、実際にコイルを設計製作する際は、80 MPa になるようにサイズ調整(オーバーサイズ)している。なおコイルの最大圧縮応力も 140 MPa 程度であり、ポリイミド絶縁が許容できる範囲であることを確認した。

### 3.5 耐放射線材料の開発

従来の超伝導コイルには電気絶縁と機械強度を合わせ持つガラス繊維強化プラスチック(GFRP)が頻繁に使用されてきた。しかし通常の GFRP はエポキシ樹脂とホウ素を含む E ガラスを主成分としているため、条件によっては数 MGy 程度の線量や中性子で劣化してしまうことが知られていた。このため、過酷な放射線環境下で運転される LHC アップグレードや COMET 実験用ミュオン捕獲ソレノイドなどの J-PARC 向け超伝導磁石への応用を目指して、2011 年から耐放射線 GFRP の開発を行ってきた。幸いメーカー(有沢製作所)からの協力も得られ、これまでに数種類の耐放射線 GFRP を開発することができた。中でもビスマレイミドトリアジン樹脂と S ガラス繊維(ホウ素を含まない)は優れた性能を示しており、図 13 に示すように、常温  $\gamma$  線照射で 100 MGy まで 3 点曲げ強度に大きな変化が見られないことを確認している。この耐放射線 GFRP を MBXF 向け超伝導コイル部品(ウェッジ, エンドエスペーサー)として使用する予定である。

### 3.6 モデル磁石開発

磁石設計や製作方法、治工具の検証を行うため、KEK 内で 2m モデル磁石の開発を行っている。7m 長実機コイルとはコイルエンド形状が全く同一であり、直線部長さのみが異なっている。

図 14 は超伝導コイル部品となるエンドスペーサー及びリード遷移のためのランプボックスの CAD モデルを示す。

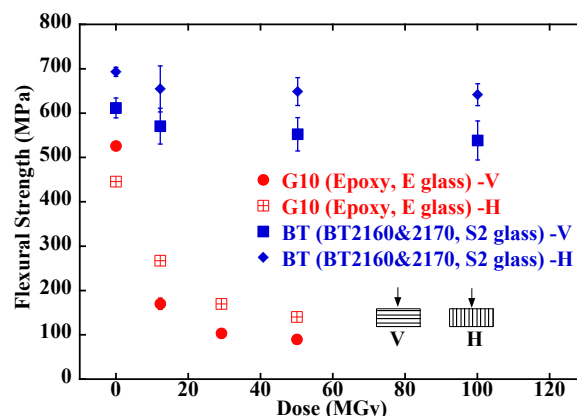


図 13 常温  $\gamma$  線照射した耐放射線 GFRP(BT) の 3 点曲げ強度。通常のエポキシ樹脂ベースの GFRP(G10) では既に 10 MGy で顕著な劣化が見られるのに対し、BT では 100 MGy まで大きな変化は見られない。

モデル磁石用の部品は、実際に KEK 機械工学センターのマシンセンターで耐放射線 GFRP パイプから加工した。CERN から供給された NbTi 超伝導ケーブルを巻き線している様子を図 15 に示す。鞍型マンドレルの上で、精密加工したウェッジ、エンドスペーサーと一緒に超伝導ケーブルを巻き付けながらコイル巻線を行う。巻線後、コイルをマンドレルごと成形ブロックに挿入する。自己融着性のケーブル絶縁とコイル部品に塗布したシアネートエステル樹脂(いずれも耐放射線性に優れる)を接着させてコイル成形するため、油圧



図 14 ROXIE 3Dモデルを元に作成したエンドスペーサーとランプボックスの 3D CAD モデル。



図 15 2m モデル磁石用超伝導コイルの巻き線の様子。



図 16 機械構造検証用断面モデル。コイル変形を抑えるため口径内部にカラーリングマンドレルが挿入された状態で組み立てを行う。

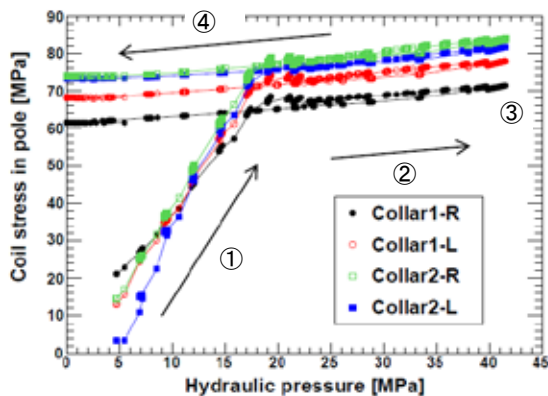


図 17 200mm 短尺モデル組立時の超伝導コイル磁極部ターンへの圧縮応力。

プレス加圧により精密にコイル寸法を制御しながら、最高 200°C まで加温する。

ステンレスカラーには、新日鐵住金ステンレスの NSSC-130S (厚さ 2.3 mm と 2.6 mm の 2 種類) を使用する。4.2 K での比透磁率が 1.002 以下でとても低くかつ安定しており、高い磁場特性を要求される加速器用超伝導磁石に適している。一方鉄ヨークは LHC MQXA 磁石や J-PARC SCFM 磁石で実績のある JFE スチール製低炭素鋼 EFE (厚さ 5.6 mm と 6.0 mm の 2 種類) を使用する。磁石構造部品には、磁場精度を満足するために高い寸法精度 (代表的な公差で 20-50  $\mu\text{m}$ ) が求められるが、同時に経済性を両立させる必要がある。このため、主要部品となるステンレスカラーと鉄ヨークは、それぞれ素材 (板) をファインブランキング (高精密打ち抜き) することで製作される。2m モデル磁石の段階で既に各部品向けのファインブランキング金型を開発しており、そのまま 7m 実機向けに部品を量産可能な体制ができてきている。ステンレスカラーに関しては、6 種類全てにお

いて寸法形状が設計目標から  $\pm 10 \mu\text{m}$  以内に収まっていることを確認している。

2m モデル磁石開発と平行して、図 16 に示すように、磁石の直線部断面に相当する機械構造検証用断面モデルを試作し、機械構造設計や組み立て方法、部品形状などを検証した。超伝導コイルには、2014 年に試作したテストコイルの直線部を切り出して用いている。その他の部品も、モデル磁石と同様の部品を使用している。ステンレスカラー、鉄ヨーク及びステンレスシェルには歪ゲージを取り付けており、カラー組み付けからシェル溶接までの各工程での磁石内部の機械的振る舞いを観察できる。代表例として、鉄ヨーク組立時の超伝導コイル磁極側ターンへの圧縮応力を図 17 に示す。図中の①で油圧プレスにより鉄ヨークが上下に押さえ込まれるのにしたが、超伝導コイルにステンレスカラーのテーパ状磁極部が挿入され、圧縮応力が発生している。その後、①から②への遷移点 (油圧で 18~22 MPa) で上下の鉄ヨークが水平面で接触した時点で、超伝導コイルはカラーを介して鉄ヨークによって位置決めされる。その後は油圧プレスで押した荷重のほとんどは鉄ヨークをカンチレバーのように曲げる力となる。③で充分曲げられ、上下からの鉄ヨークのキースロットがきれいに揃うことでキーを挿入してキー留めできる。その後④で完全に油圧プレスを抜いても、超伝導コイルへ約 70 MPa の予備圧縮応力が残っていることが判る。以降、シェル溶接やその後の液体窒素による冷却試験においても、磁石機械構造がほぼ想定通りに振る舞うことを観察した。

この原稿を執筆中の 2015 年 11 月の時点では、2m モデル磁石 1 号機向けの超伝導コイルが完成している。図 18 に示すようなモデル磁石組立を 2016 年春までに完成させ、引き続き冷却励磁試験を行って性能検証を行う予定になっている。

## 4 まとめと展望

以上、簡単ではあるが HL-LHC 計画の概要と、KEK で進

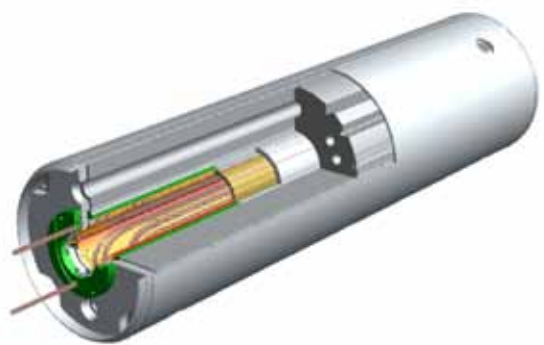


図 18 HL-LHC 向け D1 モデル磁石の 3D モデル図。

めている超伝導磁石開発を紹介した。あらためて、ATLAS 実験の高精度化に寄与することを第一に、KEK が HL-LHC アップグレードに向けた研究協力を推進していることを特に強調しておきたい。

2 章でも述べたように、2015 年は EU FP7-HiLumi LHC 設計研究の最終年度であり、今後は CERN を中心として詳細な工学設計と建設の段階に進んで行くことになっている。残念ながら、現時点では日本が HL-LHC 建設計画に参加することは決まっていない。しかし、最終ビーム収束磁石システムの中で、クライオスタットを含んだ D1 超伝導磁石の開発・製作を日本が分担し、in-kind(現物支給)で貢献することが強く期待されている。磁石単体での性能仕様の達成はもちろん重要だが、周辺機器や配管とのインターフェース、ヨーロッパの高圧ガス保安法令準拠などといった、システム完成のためのより細かく、泥臭いエンジニアリングをコツコツと進めていくことが求められる。これまで以上に CERN と密接に連携して研究協力を進めて行くことになる。

CERN は 2030 年代以降、HL-LHC を超える次世代のエネルギーフロンティア加速器として FCC(Future Circular Collider)計画を提案し、重心系衝突エネルギー 100 TeV を目標とした概念設計を開始している[12]。周長 80 km と 100 km の 2 バージョンが提案されていて、それぞれの主偏向双極磁石の定格磁場は 20 T と 16 T にも達する。計画実現のためには『超伝導線材の高  $J_c$  化と量産化』、『高磁場加速器用超伝導磁石技術の確立』が絶対条件となる。KEK も CERN と協力して、日本の線材メーカーを巻き込んだ FCC 向け Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材の開発を立ち上げようとしている。

本稿でも紹介した、世界で初めての加速器応用に向けた Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導磁石の開発は、HL-LHC 計画の成功のみならず、将来の FCC 計画実現に向けた重要なマイルストーンと位置づけられている。こうした観点からも、今後の HL-LHC 建設の進展が注目される。

## 謝辞

KEK 執行部を始め、ATLAS 日本グループ、科研費新学術領域研究「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学～真空と時空への新たな挑戦」からの御支援のもと、HL-LHC 向け超伝導磁石開発を進めています。

## 参考文献

[1] Oliver Bruning and Lucio Rossi, The High Luminosity Large Hadron Collider, ISSN 1793-1339, World Scientific.

- <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/9581>
- [2] The HiLumi LHC Collaboration, “HL-LHC Preliminary Design Report”, CERN-ACC-2014-0300, 2014.  
<http://cds.cern.ch/search?p=CERN-ACC-2014-0300>
- [3] <http://hilumilhc.web.cern.ch>
- [4] European Strategy for Particle Physics, adopted by the CERN Council at a special session at ministerial level in Lisbon in 2006.  
<http://cern.ch/council/en/EuropeanStrategy/ESParticlePhysics.html>
- [5] European Commission – 7<sup>th</sup> Framework Programme for Research – Evaluation Summary Report: HiLumi LHC\_284404.
- [6] H. Damerou et al., “Upgrade Plans for the LHC Injector Complex”, Proceedings of IPAC2012, pp. 1010-1014, New Orleans, Louisiana, USA.
- [7] <https://espace.cern.ch/liu-project/default.aspx>
- [8] Stephane Fartoukh, “Achromatic telescopic squeezing scheme and application to the LHC and its luminosity upgrade”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 111002, 2013.
- [9] F. Savary et al., “Status of the 11T Nb<sub>3</sub>Sn Dipole Project for the LHC”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 25, NO. 3, 4003205, 2015.
- [10] T. Nakamoto et al., “Model Magnet Development of D1 Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 25, NO. 3, 4000505, 2015.
- [11] M. Sugano et al., “Development Status of 2 m Model Magnet of Beam Separation Dipole for the HL-LHC Upgrade”, to be published in IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, 2016.
- [12] <https://fcc.web.cern.ch/Pages/default.aspx>