テーマ解説

LHC 高輝度化アップグレード計画

中本 建志^{*1}

The High Luminosity LHC Upgrade Project

Tatsushi NAKAMOTO^{*1}

Synopsis: While the LHC accelerator at CERN has been operating smoothly, the High-Luminosity LHC (HL-LHC) Upgrade Project, which has aimed at attaining a total integrated luminosity of 3000 fb⁻¹ for about 10 years—a factor tenfold the design value of the present LHC—was planned in order to improve the statistical precision of physics results. To realize this ambitious target, a full upgrade of accelerator elements in the insertion regions for the ATLAS and CMS experiments is crucial. In particular, large-aperture superconducting magnets with a higher field and superconducting RF crab cavities hold the key to the success of the project. In this article, an overview of the HL-LHC and its relevant R&D efforts are introduced.

Keywords: LHC, luminosity, superconducting accelerator magnet

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

欧州原子核研究機構（CERN）の Large Hadron Collider (LHC) は、世界最高エネルギーでの陽子・陽子衝突実験を行う、エネルギーフロンティア加速器である。Fig. 1 に示されるように、2つの陽子ビームは周長約 27 km のリングをそれぞれ反対方向へ周回しながら 7 TeV にまで加速された後、検出器が設置された 4ヶ所の衝突ポイントで交差する設計となっている。世界最高の重心系衝突エネルギー（7+7=14 TeV）を実現するため、トンネル内に 15 m 長ビーム偏向用 NbTi 超伝導双極磁石が 1232 台設置され、超流動ヘリウム冷却下 1.9 K において、定格 8.3 T を発生する設計となっている。このことから、LHC は世界最大規模の超伝導・極低温システムとも言うことができる。LHC の建設は 1995 年に始まったが、世界各国の研究機関も国際協力として参加しており、日本も米国とともに最終ビーム収束用超伝導四極磁石の開発・建設を分担して貢献した。

LHC は、2010 年から本格的なビーム運転を開始したが、運転初期の Run 1 では超伝導磁石間を接続するバスラインのハンダ接続不良から、衝突エネルギーは 8 TeV 以下に

抑えられていた。その後 2 年間の改修工事を経て、2015 年から再開した Run 2 では、衝突エネルギーも 13 TeV にまで回復し、またピークルミノシティも設計値 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を超えて、順調に運転が続けられている。この間、2013 年ノーベル物理学賞をもたらした『ヒッグス粒子の発見』をはじめ、数々の成果をあげている。

こうした状況の中、CERN は LHC からの物理成果を将来にわたって最大限に引き出すため、積分ルミノシティを現行の 10 倍に増大させる『LHC 高輝度（高ルミノシティ）化アップグレード（High Luminosity Large Hadron Collider: HL-LHC）』計画を立ち上げた¹⁻³⁾。本稿では、まず計画の概要を紹介した上で、プロジェクト成功の鍵を握る超伝導・極低温技術について解説する。

2. LHC 高輝度化アップグレード

2.1 概要

ビーム衝突型加速器では、物理事象（統計数）をできるだけ数多く生成させることが重要な性能指標となる。単位時間当たりの生成事象数 $Y(\text{s}^{-1})$ は、以下のように書ける。

$$Y = L \cdot \sigma \quad (1)$$

ここで、 $\sigma(\text{cm}^2)$ は反応断面積であり、 $L(\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$ はルミノシティと呼ばれる加速器の性能で決まるパラメータとなる。反応断面積は自然界で定まっている固有の値であるため、統計数を稼ぐためにはルミノシティをできるだけ向上させることが重要となる。具体的には、単位を見てわかるように、ビームの粒子数や単位時間当たりのビーム交差

Received February 16, 2017

^{*1} 高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター
〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1
Cryogenics Science Center, High Energy Accelerator Research
Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan
E-mail: tatsushi.nakamoto@kek.jp
DOI: 10.2221/jcsj.52.141

Fig. 1 Schematic layout of LHC at CERN¹⁾ (top) and inner triplet quadrupole magnets for final beam focusing (bottom). An interaction point for physics experiment is located behind a radiation shield.

数を増やし、かつ交差時のビームサイズをできるだけ細く絞ることになる。

2014 年の時点で検討されたルミノシティと積分ルミノシティの将来予測を **Fig. 2** に示す。図中の LS とは Long Shutdown の略称で、改修工事などを実施するための長期運転停止期間を意味する。さて、実際の 2016 年の加速器運転は非常に順調で、ピークルミノシティは $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 、1 年当たりの積分ルミノシティは 39 fb^{-1} に達しており、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超える新物理の探索が順調に進められている。今後は、ビームコリメータや入射加速器をアップグレードしながら、2023 年までにルミノシティを $2.0 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ にまで向上させることを目標にしている。しかし、この程度のルミノシティ増加でも統計精度の改善度合いは徐々に鈍化していくことになるため、ある時点で機器の大幅なアップグレードを行って、ルミノシティ（すなわち統計量）を劇的に増大させたいという強い要求が出てきた。ところで、積分ルミノシティが 300 fb^{-1} に達する 2020 年代には、現行の最終ビーム収束部超伝導磁石への積分吸収線量は最大で 30 MGy にもなり、有機材料の性能劣化により磁石が使用

Fig. 2 Projection of peak luminosity and integrated luminosity of LHC.¹⁾

できなくなることが予想されている。このため高輝度化アップグレードの有無とは関係なく、いずれにせよ最終ビーム収束部では更新工事が避けられない。

このような背景から、ATLAS 及び CMS 実験において、ピークルミノシティ $5.0 \times 10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ 、2037 年までの積分ルミノシティ 3000 fb^{-1} を目指す『LHC 高輝度化アップグレード (HL-LHC)』計画が提案された¹⁻³⁾。現行 LHC の積分ルミノシティの目標は 300 fb^{-1} だが、同程度の運転期間（約 10 年間）で 10 倍の統計を目指すというチャレンジングな計画である。経緯としては、2006 年の European Strategy for Particle Physics において最優先事項として承認された後⁴⁾、2011 年には EU-FP7 (欧州第 7 次研究枠組み計画) において『High Luminosity LHC Design Study』として設計研究プロジェクトが正式に採択された⁵⁾。以来、CERN が中心となり、ヨーロッパ及び日米の大学・研究機関が参加して、先端加速器機器の研究開発と設計検討を推進している。2016 年 6 月の CERN 理事会では HL-LHC 建設予算 (9.5 億スイスフラン) が承認されており、すでに研究開発の段階から建設へとプロジェクトは推移している。

日本からは、CERN との国際研究協力の枠組みの元、高エネルギー加速器研究機構 (高エネ研) が参加しており、ビーム物理、超伝導磁石、超伝導クラブ空洞、ビーム診断、入射加速器の各分野で研究開発を進めている。

2.2 アップグレードシナリオ

まず現行 LHC のレイアウトについて簡単に説明する。

Fig. 1 に示されるように、LHC は 8 つのアーク (円弧) 部と、8 つの挿入部 (Insertion Region: IR) から構成される。各アーク部の長さは約 2.8 km であり、ビームを偏向、収束するために 15 m 長超伝導双極磁石 (定格 8.3 T) と 3 m 長超伝導四極磁石 (定格 223 T/m) が 3:1 の割合で設置されている。いずれも双口径磁石であり、2 つの陽子ビームはそれぞれどちらかの口径の中を対向して周回することになる。各挿入部は約 500 m の直線になっていて、ちょうどその真ん中に検出器あるいは加速器機器が配置されている。検出器のある衝突点 (Interaction Point: IP) は 4 カ所

あり、直線部に配置された磁石群（衝突点挿入部用超伝導磁石、Fig. 1 の写真はその一部）により導かれた 2 つのビームが左右から交差し、衝突により生成された粒子を測定することになる。ATLAS 検出器がある場所は IP 1 と呼ばれ、ちょうど IR 1 の中心に位置する。時計回りに ALICE (IP 2)、CMS (IP 5)、LHC-B (IP 8) といった各実験の目的に合わせた検出器が設置されている。残りの挿入部 4 カ所には、ビーム加速のための超伝導高周波空洞 (IR 4)、コリメータ (IR3 & 7)、ビームダンプ (IR 6) が設置されている。

LHC におけるビーム衝突ルミノシティ L は、以下の式で表すことができる。

$$L = \gamma_r \frac{N_b^2 n_b f_{rev}}{4\pi\epsilon_n \beta^*} R \quad (2)$$

各パラメータを Table 1 に示す^{1,2)}。主なものをあげると、 N_b ：バンチ当たり陽子数、 n_b ：リングを周回するバンチ数、 ϵ_n ：横方向規格化エミッタンス、 β^* ：衝突点でのベータ関数（ビームのベータatron振動の振幅に関する関数）となる。なお、 R は 2 つのビームが交差することで生じる幾何的損失係数であり、

$$R = 1 / \sqrt{1 + \frac{(\theta_c \sigma_s)^2}{4\epsilon_n \beta^*}} \gamma_r \quad (3)$$

となる。先述したようにルミノシティを増大するためには、ビーム強度を増強 (N_b 、 n_b を大きく) し、衝突点でのビームサイズを絞り (ϵ_n 、 β^* を小さく)、 R をできるだけ大きく維持できるように設計すれば良い。しかし、レイアウト上の制約（例えば、加速器リングの大半を占めるアーク部の超伝導磁石は変更できない、衝突点検出器と最終ビーム収束用磁石システムとの距離は変更できない、など）を考慮した結果、次の設計方針が採択された。

- (1) ビーム強度を増強しながら、エミッタンスは現状以下に低く抑えるため、LHC 入射器 (Linac4, PSB, PS, SPS) をそれぞれアップグレードする^{6,7)}。
- (2) 衝突点でのビームサイズを細く絞り込むために、 β^* を 1/3 以下にまで減少させる。このために、衝突点挿入部の超伝導磁石を大口径かつ高磁場化する。
- (3) ビーム交差角の拡大により係数 R が減少してしまう。このため、超伝導クラブ (crab) 空洞を導入して、係数 R を現行 LHC と同程度に回復させる。

現行 LHC と HL-LHC での設計パラメータを Table 1 に示す。上述したパラメータ (N_b 、 ϵ_n 、 β^* 、 R) をそれぞれ改善させることで、仮想的なピークルミノシティは $19.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ にも達し、現行 LHC の設計値の約 20 倍となることがわかる。ただし、このままでは 1 回のビーム交差当たりの事象数が激増してしまい、検出器の許容能力をはるかに超えてしまう (パイルアップ)。このため、HL-LHC では四極磁石の磁場勾配 (つまり収束力) やビーム交

Table 1 Design parameters for nominal LHC and HL-LHC

Parameter	LHC	HL-LHC
Beam energy in collision (TeV)	7	7
Relativistic gamma, γ_r	7461	7461
Number of particles per bunch, N_b (10^{11})	1.15	2.2
Number of bunches, n_b	2808	2747
Beam current (A)	0.58	1.09
Revolution frequency, f_{rev} (kHz)	11.245	11.245
Crossing angle, θ_c (μrad)	285	590
Beta function at collision point, β^* (m)	0.55	0.15
Transverse normalized emittance, ϵ_n ($\mu\text{m rad}$)	3.75	2.50
Longitudinal emittance, ϵ_L (eV s)	2.50	2.50
RMS bunch length, σ_s (m)	0.0755	0.0755
Geometric loss factor w/o CC*, R_0	0.836	0.305
Geometric loss factor w/ CC*, R_1	(0.981)	0.829
Peak luminosity w/o CC*, L_{peak} ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	1.00	7.18
Virtual peak luminosity w/ CC*, $L_{peak} \times R_1/R_0$ ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	(1.18)	19.54
Leveled luminosity ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	NA	5.00
Integrated luminosity ($\text{fb}^{-1}/\text{year}$)	45	260
Stored energy per beam (MJ)	362	677

*CC: Crab cavity

差角などを動的に調節することで、ルミノシティを $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に固定し (レベリング)、しかも長時間に渡って維持する方式を採用する。このようにして、過剰なパイルアップを避けながら、平均ルミノシティを高く保つことで、積分ルミノシティを稼ぐことができる。

以上が HL-LHC の基本方針だが、これを実現するためには、高磁場大口径超伝導磁石と超伝導クラブ空洞の成功が鍵を握る。CERN を中心とした欧米日の国際協力で、精力的な研究開発が進められている。次章以降では、研究開発の現状と今後の計画について紹介する。

3. ビーム衝突点挿入部用超伝導磁石

3.1 概要

Fig. 3 に現行 LHC 及び HL-LHC での衝突点挿入部の磁石配置図を示す⁸⁾。横軸は検出器にある衝突点 (図の左方向) からの距離を示す。なお、衝突点を挟んだ反対側には鏡対称の磁石群が配置される。衝突点寄りから順に最終ビーム収束用四極磁石 (Q1-Q3)、補正磁石群 (Corrector Package, CP)、ビーム分離用双極磁石 (D1)、ビーム再結合用双極磁石 (D2)、クラブ空洞 (Crab Cavity)、マッチング用双口径四極磁石 (Q4) が配置される。これらの磁石は全て超伝導磁石となるが、特に高磁場化が必要となる Q1-Q3 には、 Nb_3Sn 超伝導線材が採用される。一方、その他の磁石には、既に LHC 向けに開発、量産された NbTi 超伝導線材が使用されており、このおかげで迅速な磁石開発が可能となった。

超伝導磁石の断面模式図を Fig. 4 に示す。アーク部 (Fig. 3 の右側) からビーム再結合双極磁石 D2 までは、対

Fig. 4 Cross-sections of new IR magnets at IP 1 and 5 for the HL-LHC as of December 2016. (Courtesy of Ezio Todesco, CERN)

Table 2 Main parameters of new IR magnets at IP 1 and 5 for the HL-LHC[illegible]

*70 mm aperture quadrupoles currently operating in the LHC will be used.

向する 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。

HL-LHC では、先述したように衝突点でのビームサイズを細く絞り込むために、衝突点での β^* を現在の 0.55 m から 0.15 m にまで減少させる。 β^* を小さくするトレードオフで、衝突点から約 20 m 離れたビーム収束用磁石での β は逆に大きくなり、ビームサイズも今よりも大きくなる。衝突点からの二次放射線（デブリ）を防ぐためのシールドのスペースも確保する必要があり、最終ビーム収束用磁石（Q1 から D1 まで）の口径は、現行の 70 mm から 150 mm に広げ必要がある。その一方で、挿入部において磁石に与えられるスペース（機械長）はほとんど変更できないため、これまでと同様の積分磁場を維持するためには、磁石を高磁場化する必要がある。つまり磁石の大口径化と高磁場化を両立させなければならない。各磁石の主要パラメータを Table 2 にまとめる。衝突点挿入部特有の問題は、二次放射線による影響であり、例えば Q1 から D1 までのコールドマス（約 60 m）への熱負荷は約 1 kW と予測されている。超伝導性能の向上と、甚大な熱負荷の効率的冷却のため、全ての超伝導磁石は超流動ヘリウム冷却により 1.9 K において運転される。また HL-LHC の目標積分ルミノシティ 3000 fb^{-1} に到達する頃には超伝導コイルへの積分吸収線量が最大で 40 MGy を超えることが予測されており、耐放射線特性に十分配慮した磁石材料を採用する必要がある。

3.2 最終ビーム収束用四極磁石：Q1, Q2a/b, Q3

一新される衝突点挿入部の磁石において、最も重要な役割を担うのが最終ビーム収束用四極磁石である。加速器応用としては初めて Nb₃Sn 超伝導線材が採用され、従来の NbTi よりも 30%強の高磁場化が図られている。コイル口径が 2 倍以上になったにもかかわらず、ロードライン上の運転負荷率 77%（コイルピーク磁場は 11.4 T）において、定格磁場勾配 133 T/m を発生することができる。Q1-Q3 の長さは、現行 LHC よりも約 10 m 延びるものの、42 m 程度に抑えることができる。

従来の 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 Nb₃Sn 磁石の開発は、既に 2000 年代初めに米国バークレー研究所（LBNL）やフェルミ加速器研究所（Fermilab）、ブルックヘブン研究所（BNL）で本格的に行われていた。その後、米国エネルギー省（DOE）は LHC アップグレードへの貢献を目指して US-LHC Accelerator Research Program (US-LARP) をスタートさせ、10 年以上に渡り 1 億ドル以上の開発費を投じてきた。上述した BNL、Fermilab や LBNL がプログラムに参加し、高磁場 Nb₃Sn 四極磁石の開発を進めてきた。CERN も LHC 建設が完了してから Nb₃Sn 超伝導磁石開発に着手し、US-LARP との国際協力で技術移転を受けつつ、人員や設備の準備を整えながら CERN 自身による R&D を進めてきた。

HL-LHC 向けに求められる Nb₃Sn 超伝導線材の性能仕様は大変厳しく、15 T における Non-Cu J_c は 1340 A/mm^2 以上が求められる。しかも、フラックスジャンプや磁化電流の

影響を抑えるために、フィラメント径は 50 μm 以下であることが必要となる。また安定化材（銅）の残留抵抗比（RRR）は 150 以上が要求され、ラザフォードケーブルを熱処理する際にも、銅部にスズが拡散しないような対策が求められる。近年 ITER 計画に向けて大幅に性能向上が達成された Nb₃Sn 線材にとっても、これらの仕様は大変チャレンジングであり、CERN や US-LARP は長年にわたって線材メーカーと協力して線材開発を進めてきた。実際に条件をクリアできるのは、現在のところ米国 OST（Oxford Superconducting Technology）社の RRP 線（内部スズ法）と、ドイツ Bruker-EAS 社の PIT（powder in tube 法）線の 2 つのみとなっている。HL-LHC 向け Nb₃Sn 線材の開発と調達状況については、文献を参照されたい⁹⁾。

従来の加速器用 NbTi 超伝導コイルでは、必要な磁場性能を達成するには、コイル寸法の製作誤差を数 10 μm 以内に抑えることが指標とされてきた。一方 Nb₃Sn コイルでは、ラザフォードケーブルを巻き線後、型内で熱処理したあと、樹脂含浸により成形される。Nb₃Sn 素線の寸法は熱処理前後で異質的に変化するため、最終形状を制御することがそもそも難しい。また、厚さが 0.1 mm を超えるガラス繊維ケーブル絶縁や樹脂含浸用型内でのクリアランスなども、コイル形状の製作誤差が大きくなる要因となる。

また、一般に Nb₃Sn 線材は応力下で超伝導性能が低下することが知られている。HL-LHC では大口径化と高磁場化の相乗効果のため、超伝導コイルに必要な組み立て予備応力が増加し、Nb₃Sn 線材の限界を超える懸念があった。多くの NbTi 超伝導磁石では、ステンレス製カラーや鉄ヨークにより超伝導コイルを機械支持する設計が採用されてきたが、HL-LHC の Nb₃Sn 最終ビーム収束用四極磁石では、Fig. 4 に示されるように、最外周のアルミシェル（円筒）で機械支持する方式を採用した。鉄ヨークとカラーは、コイルとアルミシェルを埋めるスペーサーであり、内部の隙間にブラッダーと呼ばれる金属風船を挿入し、水圧により膨らませて広がった隙間にキー挿入することで予備応力を与える。設計の肝は、冷却時のアルミシェルの熱収縮を利用して最終的な予備応力を与えるようにした点で、このおかげでコイル圧縮応力は常温組み立て時で 100 MPa 以下、冷却、励磁時でも 150 MPa 以下に抑えることができる。

最終ビーム収束用四極磁石の名称は MQXF と呼ばれ、Q1 及び Q3 の製作を US-LARP が分担し、CERN が Q2a 及び Q2b を受け持つことになっている¹⁰⁾。しかし、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 年からは、実機と同一断面で直線部長さのみが短い 1 m 長モデル磁石の製作が始まっており（Fig. 5）、2018 年までに 6 台のモデル磁石を開発して性能評価を進める計画となっている。2016 年に試験したモデル磁石 1 号機のトレーニング性能は良好で、クエンチ電流は受け入れ基準（定格電流の 108%）を超えることができた¹¹⁾。

Fig. 5 Assembly of the first model MQXF magnet at LBNL. (Courtesy of Daniel Cheng, LBNL)

また磁場特性についても、鉄の飽和による振る舞いや allowed 成分 (12 極、20 極、28 極...) が、モデル計算と良く一致することを確認できた¹²⁾。実機と同一サイズのプロトタイプ開発も同時並行で進んでおり、2019 年までに US-LARP で 3 台、CERN で 2 台を製作する。その後は実機製造に移り、2024 年までに予備機 2 セットを含む 10 セットを、CERN と米国それぞれで分担する。

3.3 ビーム分離双極磁石 : D1

ビーム分離用双極磁石 D1 の研究開発は、高エネ研が担当している。Fig. 3 に示されるように、最終ビーム収束用四極磁石の延長に加え、D2 と Q4 との間に挿入される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 56 m となってしまう。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、6.3 m、コイル口径 150 mm) にアップグレードする。

高エネ研では、CERN と協力して 2011 年から磁石設計を開始し、2016 年に 2 m 長モデル磁石 1 号機を所内試作した。1 号機の冷却励磁試験では、定格電流 12 kA の 105%まで通電することができた。磁場計算も全般的に測定結果を再現することを確認した¹³⁾。D1 磁石開発の詳細は本誌の別のテーマ解説を参照されたい¹⁴⁾。

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

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、ビーム再結合双極磁石 D2 もコイル口径を 105 mm に拡大する必要がある。D2 での設計の難しさは、2 コイルの中心間隔が 188 mm の双口径磁石でありつつ、大口径化、高磁場化に対応しなければいけない点である。しかもビーム再結合のためには 2 コイルの磁場方向を揃える必要があるため、磁束はそれぞれのコイルの片側の鉄ヨークを偏ってリターンすることになる。電磁設計では、高磁場化による鉄の飽和の影響や非対称性に十分注意する必要がある、

容易ではない。D2 は、INFN-Genova (イタリア) が研究開発を担当している¹⁵⁾。

マッチング用双口径四極磁石 Q4 についても、検討当初は口径を 90 mm にまで拡大することを前提に磁石設計が進んでいた。しかし 2017 年 2 月現時点では、既存の 70 mm 口径四極磁石を HL-LHC に再利用する方針を採っている。なお、CEA-Saclay (フランス) で新規開発する 90 mm 口径四極磁石は、将来の高性能化オプションとして位置付けられている。

3.4 補正磁石

最終ビーム収束部には、主磁石の他に、ビーム軌道修正用補正磁石 (Fig. 5 中の Orbit corrector) やスキュー四極 (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 (Non-linear correctors) が設置される。CIEMAT (スペイン) 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軸上に配置する、いわゆるネスト型になっている¹⁶⁾。両コイルを同時に励磁すると非常に大きなトルクが発生するため、機械構造設計がとても難しい。スキュー四極及び Non-linear 補正磁石は、イタリアの INFN-LASA が開発を担当している¹⁷⁾。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、いわゆる『Superferric Magnet』と呼ばれる磁石設計を採用している。

4. 超伝導クラブ空洞

磁石部でのビームサイズが大きくなると、ビーム同士の干渉を避けるためにビーム交差角を大きくする必要がある。そうすると、式 (3) にあるように幾何的損失係数 R が今よりも小さくなってしまい、ルミノシティ増加への効果が薄まってしまう。このため超伝導クラブ空洞 (Crab Cavity) を用いて、ビームバンチに横方向のキックを与えることで、交差時のビームがあたかも真正面から衝突するのと等しくなり、係数 R を現行 LHC と同程度に回復することができる (Fig. 6)。なおクラブ空洞は高エネ研の KEKB 電子・陽電子加速器において世界で初めて実用化されたが、陽子加速器としては HL-LHC が初めてとなる。

クラブ空洞の材質は純ニオブであり、運転周波数は LHC 加速用空洞と同じ 400.79 MHz、キック電圧は 1 空洞あたり 3.4 MV である。LHC 特有の制約条件として、194 mm 離れたもう片方の陽子ビームと干渉しないこと (Fig. 3)、キックする方向は鉛直面 (ATLAS) と水平面 (CMS) のビーム交差それぞれに対応すること、があげられる。これらの条件はクラブ空洞の幾何形状に強い制限を与えることになる。いくつかのデザインが提案され、最終的に鉛直キック用として DQW (Double Quarter Wave) タイプ、水平キック用として RFD (RF-Dipole) タイプの 2 つの異なるデザインを採用することになった (Fig. 7)。なお、クラブ空洞について

Fig. 6 Schematic of bunch rotation induced by crab cavities to maximize the overlap of the two beam distributions at the interaction point.¹⁾

Fig. 7 Crab cavities for HL-LHC: Double-Quarter-Wave (DQW) cavity for vertical crossing at ATLAS (left) and RF-Dipole (RFD) cavity for horizontal crossing at CMS (right). (Courtesy of Rama Calaga, CERN)

も、主に CERN と US-LARP が協力して開発を進めており、DQW 及び RFD ともプロトタイプ単独での試験では仕様を満足する性能を確認できた^{18, 19)}。高エネ研も、表面研磨の分野で貢献している。HL-LHC 開始の時点では、D2 の背後に各ビーム当たり 2 台ずつ (Fig. 3)、全部で 16 台のクラブ空洞を設置する予定だが、将来のオプションとしてさらに 16 台を設置することも視野に入れている。実機空洞製造を開始するための重要なマイルストーンとして、陽子ビームを用いた実証実験を 2018 年に計画しており、そのための準備が急ピッチで進められている。

5. その他のアップグレードシステム

これまでに述べてきた衝突点挿入部の超伝導磁石やクラブ空洞以外にも、HL-LHC では、加速器システムの大掛かりなアップグレードや工事が必要となる。以下では、特に低温、超電導技術に関連するものについて紹介する。

5.1 R2E 対策と超伝導リンク

高輝度化により最も懸念されているのが、放射線に起因する加速器トンネル内の電子機器の故障であり、すでにこれまでの LHC 運転でも頻繁に発生している。HL-LHC での高輝度化と比例して放射線由来のトラブルが増加することが予測されているため、CERN では 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。衝突点挿入部磁石向けの電源についても、遠隔に新設するサービストンネルへ移設される予定である。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、長さ 100 m、合計電流容量 110 kA にも達する超伝導バスライン (Superconducting Link) を

ATLAS と CMS 検出器のある IR 1 と IR 5 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_2 超伝導体の大規模工学応用であり、導体開発やプロトタイプリング、フィードボックスの設計が進められている。

5.2 コリメータアップグレードと 11T 双極磁石の開発

HL-LHC では、2 つの陽子ビームの蓄積エネルギーを合計すると 1.3 GJ にまで達してしまう。コリメータシステムのアップグレードも、ビームロスに起因する超伝導磁石のクエンチを防ぐために欠かすことができない。特に IR 7 の Dispersion Suppressor 領域 (挿入部と隣接するアーク部の最終端部) では、新規コリメータを設置する強い要請があったものの、そのためのスペース (2.5 m) が無かった。このため、既設の 8.3T 超伝導双極磁石と同じ磁場長を維持しつつ、機械長は短くて済む 11T-Nb₃Sn 双極磁石 (11 T ダイポール) に入れ替えることを計画している (Fig. 8)。最終ビーム収束用四極磁石と同様に、実現すれば Nb₃Sn 超伝導コイルの初めての衝突型加速器への応用となる。Fermilab での概念設計及び単口径モデル磁石開発を経て、CERN に技術移管され、双口径モデル磁石、プロトタイプが開発されてきた²⁰⁾。11 T ダイポールは組み合わせるコリメータと共に、2018 年からの LS2 (Fig. 2 参照) での設置が必要であるため、現在 CERN で急ピッチでの実機磁石製作が進められている。

5.3 ヘリウム冷凍プラントの新設

HL-LHC では、ルミノシティ増加に伴い、1.9 K に冷却される衝突点挿入部磁石 (Fig. 3 の Q1 から D1 まで) へのビーム熱負荷が、155 W から 630 W にまで増大する。このため、既存のヘリウム冷凍プラント (8 ヶ所) の他に、IR 1 と IR 5 にそれぞれ衝突点挿入部磁石専用ヘリウム冷凍プラントを新設する。4.5 K での冷凍能力は 18 kW (1.8 K での冷凍能力 3 kW を含む) を予定している。コールドコンプレッサーやバルブユニットを地下に配置するために、大規模な土木工事を行い、地下空洞 (cavern) やサービス

Fig. 8 Side view of 11 T Dipole full-assembly with LEN collimator (top) and cross-section of 11 T dipole (bottom). (Courtesy of Frederic Savary, CERN)

トンネル、地上部と繋ぐシャフトなどを新設する。ただし、地下の土木工事による振動はビーム実験に影響を与えるため、運転を停止する LS2 (2019~2020 年) の期間内に土木工事を完了させる予定である。ヘリウム冷凍機システムの設置は、LS3 (2024 年以降) を予定している。

また IR 4 の超伝導高周波空洞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 4 kW) を、LS2 に新設する計画になっている。

6. まとめと今後の展望

以上で述べてきたように、LHC 高輝度化アップグレードに向けた様々な研究開発が CERN を中心とする欧米日で行われている。再三紹介しているように、ルミノシティを目論み通り向上できるかどうかは、衝突点挿入部の 2 種類の超伝導機器 (磁石及びクラブ空洞) が成否の鍵を握っている。2026 年のビーム運転まで、長期間にわたり気の抜けない大型プロジェクトが始まった。

さて、さらに将来に目を向けると、ヨーロッパの高エネルギー物理コミュニティでは、HL-LHC を超える次世代のエネルギーフロンティア加速器 Future Circular Collider (FCC) の概念設計検討をすでに開始している²¹⁾。標準理論を超える新しい物理の発見を目指し、重心系衝突エネルギー 100 TeV の加速器を目標としており、周長 80-100 km にわたって 16-20 T 級超伝導磁石を並べることになる。必要となる超伝導線材量も約 9000 トンと算定されており、性能、物量ともに空前絶後の計画といえる。その実現のためには『Nb₃Sn 線材の高 J_c 化とコストダウン』と『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。このような背景から、HL-LHC での Nb₃Sn 超伝導磁石の開発は、FCC に進むための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。

参 考 文 献

- 1) O. Brüning and L. 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)
- 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 – 7th Framework Programme for Research – Evaluation Summary Report: HiLumi LHC_284404
- 6) H. Damerau, et al.: "Upgrade plans for the LHC injector complex," Proceedings of International Particle Accelerator Conference 2012 (IPAC2012) (2012) 1010-1014

- 7) <https://espace.cern.ch/liu-project/default.aspx>
- 8) E. Todesco, et al.: "A first baseline for the magnets in the High Luminosity LHC insertion regions," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4003305
- 9) A. Ballarino and L. Bottura: "Targets for R&D on Nb₃Sn conductor for high energy physics," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 6000906
- 10) P. Ferracin, et al.: "Development of MQXF: The Nb₃Sn low-β quadrupole for the HiLumi LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4000207
- 11) G. Chlachidze, et al.: "Performance of the first short model 150-mm-aperture Nb₃Sn quadrupole MQXFS for the High-Luminosity LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** (2017) 4000205
- 12) S.I. Bermudez, et al.: "Magnetic analysis of the Nb₃Sn low-beta quadrupole for the High Luminosity LHC," accepted for publication in IEEE Trans. Appl. Supercond. **27** (2017)
- 13) M. Sugano, et al.: "Development status of a 2-m model magnet of beam separation dipole for the HL-LHC upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4002606
- 14) M. Sugano: "Development of the beam separation dipole for the HL-LHC upgrade," TEION KOGAKU **52** (2017) 149-156 (in Japanese)
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
- 15) S. Farinon, P. Fabbicatore, S. Curreli and E. Todesco: "The design of superconducting separation dipoles D2 for the high luminosity upgrade of LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4001504
- 16) J.A. García-Matos, F. Toral and P. Fessia: "Magnetic and mechanical design of the nested orbit correctors for HL-LHC," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4102005
- 17) G. Volpini, et al.: "NbTi superferric corrector magnets for the LHC luminosity upgrade," IEEE Trans. Appl. Supercond. **25** (2015) 4102605
- 18) B. Xiao, et al.: "Design, prototyping, and testing of a compact superconducting double quarter wave crab cavity," Phys. Rev. ST Accel. Beams **18** (2015) 041004
- 19) S.U. De Silva and J.R. Delayen: "Cryogenic test of a proof-of-principle superconducting rf-dipole deflecting and crabbing cavity," Phys. Rev. ST Accel. Beams **16** (2013) 082001
- 20) F. Savary, et al.: "The 11 T dipole for HL-LHC: status and plan," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4005305
- 21) M. Benedikt, et al.: "FCC-hh hadron collider - Parameter scenarios and staging options," Proceedings of the 6th International Particle Accelerator Conference (IPAC 2015) (2015) 2173-2176

中 本 建 志 1968 年 11 月生。1991 年九州大学工学部応用原子核工学科卒業。1996 年九州大学大学院工学研究科博士課程修了。同年、高エネルギー物理学研究所低温センター (現 高エネルギー加速器研究機構 超伝導低温工学センター) 着任。2013 年教授。加速器及び素粒子原子核実験用超伝導磁石開発に従事。低温工学・超電導学会、日本物理学会、日本加速器学会、日本原子力学会会員。博士 (工学)。