

DEVELOPMENT OF SUPERCONDUCTING MAGNETS FOR LHC LUMINOSITY UPGRADE (1)

- SCENARIOS AND CONTRIBUTION FROM KEK -

Tatsushi Nakamoto[#], Qingjin Xu, Masami Iio, Toru Ogitsu, Nobuhiro Kimura, Ken-ichi Sasaki, Akira Yamamoto, Makoto Yoshida, Ezio Todesco^{A)}, Lucio Rossi^{A)}

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{A)} European Organization of Nuclear Research (CERN)
CH-1211, Geneve 23, Switzerland

Abstract

Conceptual design study for the High Luminosity LHC upgrade (HL-LHC) is underway within a framework of the international collaboration to achieve the design luminosity of $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ for the ATLAS and CMS experiments. One of the major upgrade items in the HL-LHC will be the replacement of the present low beta insertion magnet system. Conceptual design study for the large aperture superconducting dipole magnet for the beam separation has been carried out by KEK.

LHC 高輝度アップグレード用超伝導磁石の開発 (1)

- 全体計画と高エネ研の開発分担 -

1. はじめに

CERN-LHC 加速器は 2010 年から運転を開始し、徐々に装置の性能を向上させながらビーム衝突実験を行ってきた。これまでに順調にデータを蓄積しており、近い将来にヒッグス粒子の発見等の新しい成果を上げることが期待されている。しかしその一方で、衝突ルミノシティ（輝度）を向上させるための高輝度化アップグレード計画（High Luminosity LHC Upgrade: HL-LHC）の検討も既に始まっている。

本講演では、LHC 高輝度化アップグレードの全体概要と高エネ研で実施している超伝導磁石の研究開発について報告する。

2. LHC 高輝度化アップグレード計画

2.1 計画概要

図 1 に現在の LHC の概観図を示す。LHC には、4つのビーム衝突点があり、そのうち ATLAS 実験と CMS 実験において、高エネルギー陽子・陽子衝突による標準理論の検証と、さらにそれを越える新しい物理の探索を行っている。そのためには測定事象の統計量を増加することが重要で、できるだけ速やかに LHC の衝突ルミノシティを設計値ないしはそれ以上に向上させることが求められている。

図 2 に、現行の LHC が計画通り運転された場合に予測される積分ルミノシティと、その時点から統

計誤差を半分にするために必要な時間の年次プロファイルを示す。図 2 を見て判る様に、現行の設計ルミノシティ（ $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ ）に到達すると数年後には統計精度の改善が頭打ちとなり、衝突ルミノシティを改良しないままでは多大の運転時間が必要になることが予測されている。

以上の理由から、ATLAS 及び CMS 実験における

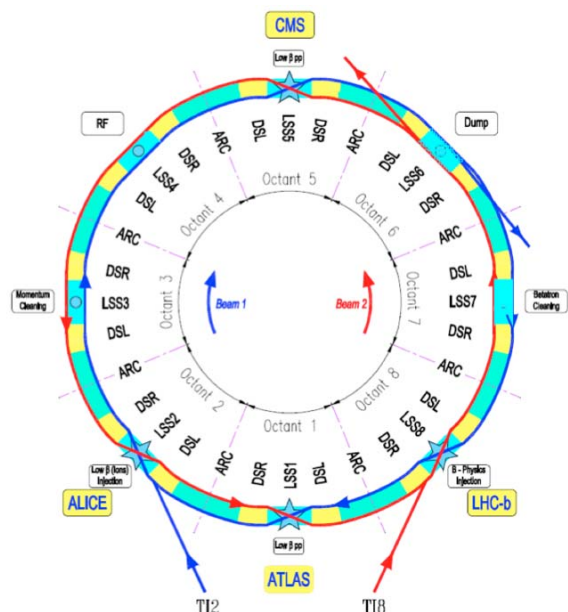


図 1 : 現行 LHC の概観図。

[#] tatsushi.nakamoto@kek.jp

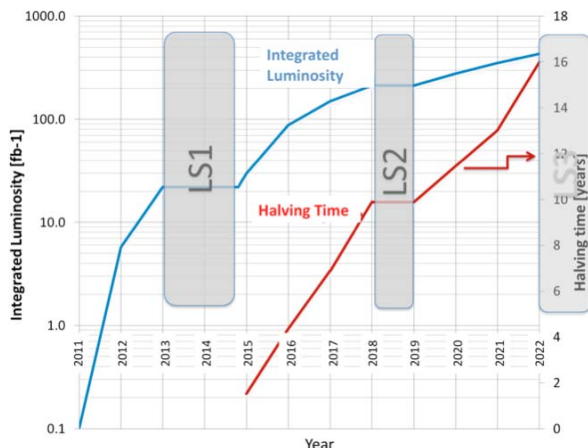


図 2：現行 LHC で予測される積分ルミノシティ（青）及びその時点から統計誤差を半分にするために必要な運転時間（赤）の年次プロファイル。LS1 及び LS2 は LHC 及び ATLAS、CMS 検出器の性能維持のための長期シャットダウンで、主な高輝度化アップグレードは LS3 に予定されている。

衝突ルミノシティを現在の 5 倍に向上させ、10 年間の実験期間で積分ルミノシティ 3000 fb⁻¹ を達成することを目標とした、HL-LHC アップグレード計画が検討されている。現時点での HL-LHC の主な設計パラメータを表 1 にまとめる。これらの目標を達成するために、入射加速器の改良、ビーム衝突点超伝導磁石の交換、クラブ空洞やコリメータの導入など大掛かりなハードウェアの開発、改良、更新が検討されている。これらの改修工事は、図 2 に示される長期シャットダウン LS1、LS2 においても段階的に実施される予定だが、主な HL-LHC アップグレードは 2022 年からの LS3 に予定されている。

2.2 概念設計体制と国際協力

HL-LHC アップグレードに向けた概念設計を進めるための研究体制を図 3 に示す。概念設計の段階から、CERN を中心とした国際協力・共同研究として実施されている。設計項目は非常に多岐に渡っており、ビーム光学設計はもちろんのこと、磁石、クラブ空洞、コリメーション、電源、ヘリウム冷却などが含まれている。

高エネ研は、EC-FP7（ヨーロッパ第 7 次研究枠組み計画）に採択された『HiLumi-LHC 概念設計研究』に 2011 年秋から正式に参加しており、特に加速器物理・ビーム光学(WP2)、超伝導磁石(WP3)、クラブ空洞(WP4)の各サブグループに参加して、研究活動を行っている。

3. ビーム衝突点超伝導磁石システム

3.1 概要

WP3 では、主に新しいビーム衝突点超伝導磁石システムについて研究を行っている。CERN を中心に CEA-Saclay、米国（BNL, Fermilab, LBNL）及び高

表 1：HL-LHC における主な設計パラメータ

	現行 LHC	HL-LHC
陽子・陽子衝突エネルギー (TeV)		7 + 7
ルミノシティ (cm ⁻² sec ⁻¹)	1x10 ³⁴	5x10 ³⁴
電流 (A)	0.56	1.02
β* (m)	0.55	0.15
ビーム交差角 (μrad)	300	475
クラブ空洞	無	有
10 年間積分ルミノシティ (fb ⁻¹)	300	3000

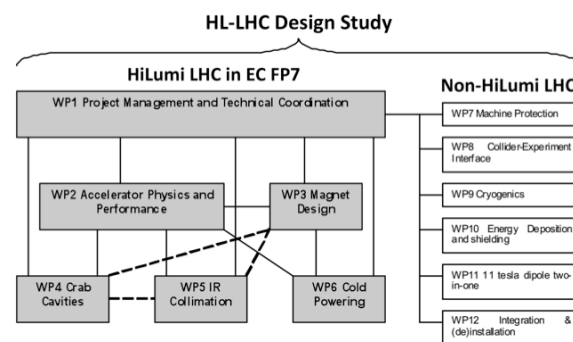


図 3：HL-LHC 概念設計の研究体制。

エネ研が研究開発、概念設計に参加している。主な目的は、先述したように HL-LHC でのルミノシティ向上だが、そもそも現行 LHC のビーム衝突点超伝導磁石システムは、積分ルミノシティが 300fb⁻¹ に達する 2021 年頃には放射線損傷により交換が必要になると予測されており、新規磁石システムの研究開発の重要性、緊急度は高い。

図 4 に、現行 LHC ビーム衝突点超伝導磁石システムの配置図と HL-LHC に向けた磁石設計分担を示す。HL-LHC でのビーム最終収束四極磁石 Q1~Q3 には、特に 10 T を超える高磁場化が求められるため、従来の NbTi に置き換わる Nb₃Sn 超伝導コイルの採用が検討されている。米国の上記 3 研究所を中心とした US-LARP (LHC Accelerator Research Program)において重点的な開発が進められている。一方バックアッププランとして、CERN においては NbTi 超伝導コイルによる開発も平行して行われている。

3.2 ビーム分離用大口径双極磁石(D1)

高エネ研は、ビーム最終収束四極磁石 Q1~Q3 の直後に隣接して、陽子ビームを衝突用軌道（1つ）から周回用軌道（2つ）に戻すためのビーム分離用大口径双極磁石(D1)の概念設計を担当している。現時点での主な設計パラメータを表 2 に示す。

高い磁場精度やクエンチの無い安定した通電性能はもちろんだが、以下に示す性能、仕様が特に求められる。

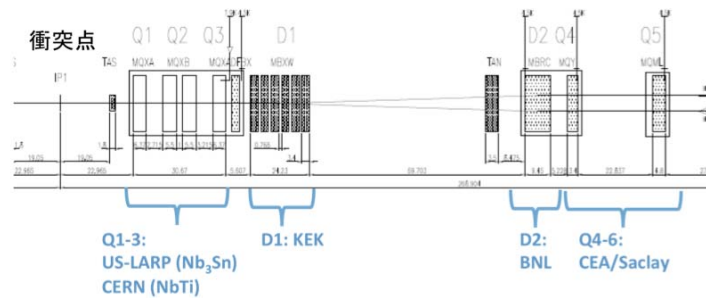


図4：現行LHC ビーム衝突点超伝導磁石システムと HL-LHC アップグレードにおける各磁石の分担。

- ビーム交差角や磁場精度の向上の観点から、大口径化（80 mm→160 mm）が求められる。このため、超伝導コイルの応力や蓄積磁気エネルギーが増大し、機械構造やクエンチ保護に注意が必要になる。
- 大口径化にも関わらず、LHC トンネルの制限からクライオスタットのサイズ、ひいては鉄ヨーク外径は従来とほとんど変えられない。このため、漏れ磁場による周辺機器との干渉、磁場精度の劣化が予想される。
- ルミノシティ向上に伴い、放射線線量、入熱量が飛躍的に増大する。例えば、ビームパイプが現行のままだと、コイルの最大吸収線量 300 MGy、システム全体への定常入熱 800 W と予想されている。材料の耐放射線性能や超伝導コイルからの除熱性能の向上、冷却システムの増強が必要になる。

図5に現在検討している超伝導磁石の断面と 1/4 コイルでの磁場分布を示す。現行 LHC アーク部主双極磁石で使用された外層用 NbTi ケーブルの余材を採用している。漏れ磁場を防ぎ、できるだけ鉄ヨークによる磁束リターンを期待するため、闇雲な高磁場化は行わず、超伝導コイルは1層構造とした。1.9 K での 70% の負荷率で、直線部定格磁場 5 T を発生する。また超伝導コイルの応力も、充分許容範囲に収まっている。その他の概念設計検討の詳細については、次の講演^[1]で報告する。

なお、設計検討と平行して、従来のエポキシ樹脂より耐放射線性に優れた有機系絶縁材料の開発や、超伝導線材の中性子照射による影響の実験的評価などの研究開発も進めている。

4. まとめと今後の予定

CERN を中心とした国際共同研究の一環として、高エネ研では HL-LHC アップグレードを目指したビーム分離大口径超伝導双極磁石の概念設計を行っている。2012 年度に概念設計を完了させ、引き続き 2013 年度以降に詳細な工学設計を行う。平行して、ビーム衝突点で特に問題となる、耐放射線性能と除熱に関する研究を進める。

参考文献

[1] Q. Xu, et al., “Development of superconducting magnets for LHC luminosity upgrade (2) –Conceptual design of a large

aperture dipole magnet for beam separation-”, FRLR02, 第9回日本加速器学会年会, Aug. 8-10, 2012

表2：ビーム分離用大口径二極磁石の主な設計パラメータ

積分二極磁場	40 Tm
定格磁場／ピーク磁場(2D)	5.04 T / 5.9 T
コイル口径	160 mm
磁石外径	570 mm
運転温度	1.9 K (HeII)
多極磁場(参照半径 50 mm)	< 10 ⁻⁴

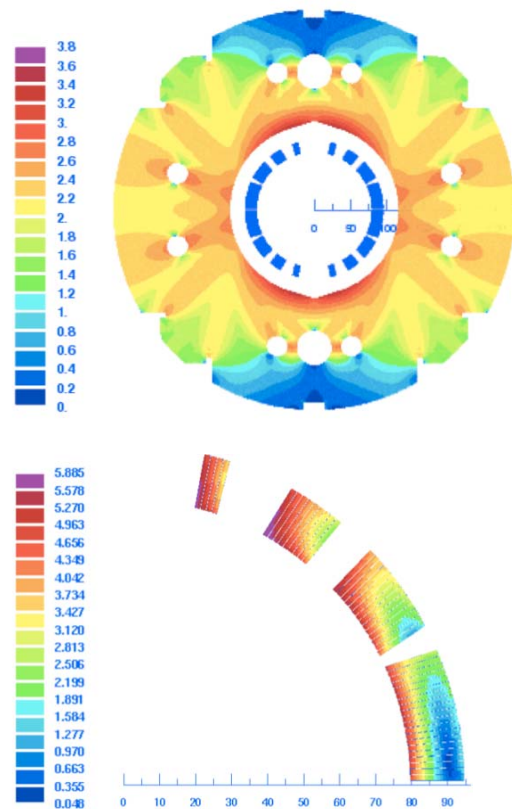


図5：ビーム分離用大口径二極磁石(D1)の断面図（上）及び 1/4 コイルでの磁場分布（下）（単位は T）。