

加速器将来計画のための超伝導磁石用有機材料のガンマ線照射による 耐放射線性検証

英文利用課題名：Evaluation of Radiation Hardness on Materials used in
Superconducting Magnets for Future Accelerator Projects

シェン テンミン¹⁾
Tengming SHEN

荻津 透²⁾
Toru OGITSU

¹⁾ Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) ²⁾ 高エネルギー加速器研究機構

（概要）LBNL では、HL-LHC-AUP (High Luminosity LHC Accelerator Upgrade Program) や US-MDP (Magnet Development Program) に沿って現在、欧州原子核研究機構 CERN の大型ハドロン衝突型加速器 LHC のアップグレード計画やその先の将来の高エネルギー加速器のための超伝導磁石の研究開発を行なっている。近年の加速器応用においては粒子ビームの大強度化に伴って放射線照射量も増加する傾向があり、LHC のアップグレード計画においても超伝導磁石への照射量が 40MGy に達すると考えられている。また将来計画においてはより強い照射量も想定されそこで使われる材料に対して γ 線照射量で 100MGy 相当までの評価が必要不可欠になっている。本研究の目的は、HL-LHC や将来の高エネルギー加速器での超伝導磁石への適用を評価するため、有機複合材料について最大 100 MGy までの γ 線照射を段階的に行い、各種の特性評価試験により、材料の性能限界を実験的に検証することである。

キーワード：超伝導磁石、加速器、耐放射線有機材料

1. 目的

欧州原子核研究機構（CERN）の LHC (Large Hadron Collider) は、世界最高の重心系衝突エネルギー 13 TeV 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。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、これまで多大な成果をあげている。LHC では、超流動ヘリウム冷却下 1.9 K において定格磁場 8.3 T を発生する最先端の加速器用高磁場超伝導磁石を採用されている。またビームを衝突させて物理実験を行うエリアでは、ビームを衝突点に向けて収束させる最終収束磁石が日米の協力で開発されてそれぞれの国で製造された磁石が LHC への貢献として設置されている。これらの磁石は、衝突点からの多量の放射線により 2020 年代前半には放射線劣化のため使用できなくなることが予測されている。CERN ではこれを契機に、実験精度の向上を目的として、LHC の積分ルミノシティを現行の 10 倍に増大させる『HL-LHC 高輝度化アップグレード』計画¹⁾²⁾を立案し、建設が承認された。ルミノシティ増加に伴い、衝突点からの放射線量はさらに増え現状では、計画している実験統計に到達するまでに超伝導磁石への照射量は 40MGy 程度になると見積もられている。一方アップグレードでは、より強くビームを絞る必要からより高磁場の超伝導磁石を使用する必要がある。LBNL では、LHC への米国からの貢献としてこの高磁場磁石として Nb₃Sn 超伝導磁石の開発を主導してきた。この超伝導磁石システムにおいても電気絶縁や熱絶縁のために多くの有機材料を利用する必要があり、それらの材料の耐放射線性を評価する必要がある。また CERN や米国は LHC を超える 100TeV 級の衝突型加速器³⁾も提案し始めており、ここではさらに厳しい放射線照射環境が想定されている。これらのことから HL-LHC のみならず将来の加速器計画を想定した場合、超伝導磁石に用いられる材料の照射損傷の評価は必要不可欠となっている。そこで本研究では、HL-LHC で要求される 40MGy やその先の将来計画を見据え 100MGy レベルでの照射試験を行い、超伝導磁石に利用される各種有機材料（複合材料を含む）の耐放射線性を評価する。

今年度の評価対象は樹脂としては、CTD101K、NHMFL mix61、ATLAS ECT の 3 種類になる。CTD101K は超伝導磁石など極低温応用で比較的放射線レベルの高い環境でよく使われるもので、今回の試験については標準サンプルとなる。NHMFL mix61 と ATLAS ECT は、LBNL が低温での割れ特性の観点から CTD101K の代用樹脂として候補に挙がっている。超伝導磁石応用においては樹脂の低温での割れは磁石構造の脆弱化を引き起こすだけでなく、割れによって解放されたエネルギーによるクエンチ

の原因となったりする。したがって低温での割れ特性のいい接着剤の仕様が好まれる。これらの代用樹脂はその観点から評価対象となっているが照射効果による影響の評価ができていないため今回の測定対象となっている。

2. 実施方法

本研究に採用される有機複合材料は、基本的に高強度化のため S2 ガラス繊維を基材としている。また、耐放射線性を考慮してガラス転移温度の高い樹脂を選定しており、これらを組み合わせた高機能複合材料である。具体的には、以下の 3 種類の樹脂と、供給メーカーで成形された 6 種類の複合材料の合計 9 種類を照射試験に供する（表 1）。試料を装荷するためのアルミ製ホルダー（幅 300 mm）は、幅方向 18 スロットが 2 段となっており、各段に目標線量毎の試料グループを装荷する。照射後、各試料に対して次の特性評価測定を実施する。評価試験温度は常温と 77 K の 2 点で、試料数は表 3 に示す通りである。

樹脂単体： 3 種類。樹脂を単独で硬化させたもの。

機械特性 照射線量： 25, 50, 75, 100 MGy

(A) 引っ張り試験： 180 mm x 20 mm x 6.6 mm Dog bone
複合材料： 6 種類。

機械特性 照射線量： 25, 50, 75, 100 MGy

(B) 曲げ強度： 25 mm x 6.3 mm x 3.2 mm

(C) 圧縮： 3.2 mm thick x 6.3 mm x 6.3 mm

(D) 圧縮剪断： 12.7 mm in dia x 8.3 mm with the insulation as 1.3 mm

試料は全て LBNL が準備し（SHEN, WANG）、 γ 線照射施設での設置作業は高エネ研（荻津、中本、菅野、鈴木）が担当する。照射後の特性評価試験は LBNL で実施する。

3. 結果及び考察、今後の展開等

2019 年度には全ての種類のサンプルについて 25MGy と 50MGy までの照射が完了しサンプルは米国 LBNL に送付され保管中である。目視での調査では 3 サンプルとも特に大きな劣化は見られていない。現在、75MGy と 100MGy の照射を目指して引き続き 2020 年度も照射を行っており、2020 年 4 月末までに 75MGy、2020 年 9 月末までに 100MGy の照射を完了する予定である。全ての照射を完了したのち LBNL で各種機械特性試験を行い。2021 年度中には国際会議（MT27 International Conference on Magnet Technology: Nov.15-19 2021, Fukuoka, Japan）及び論文（IEEE Transaction on Applied Superconductivity）にて成果を公開する予定。

4. 引用(参照)文献等

- [1] Oliver Bruning and Lucio Rossi, The High Luminosity Large Hadron Collider, ISSN 1793-1339, World Scientific.
[2] 中本建志, LHC 高輝度化アップグレード計画、低温工学 52 巻(2017)3 号、pp.141-148, ISSN 1880-0408
[3] Michael Benedikt, Frank Zimmermann, FCC: Collider at the Energy Frontier, IPAC2018, 2908-2913, DOI: 10.18429/JACoW-IPAC2018-THYGBD1

表 1 γ 線照射を行う HL-LHC 超伝導磁石向け樹脂及び有機複合材料

樹脂 3 種類	CTD101K
	NHMFL mix61
	ATLAS ECT
複合材料 6 種類	CTD101K + as received S2 glass
	CTD101K + de-sized S2 glass
	NHMFL mix61 + as received S2 glass
	NHMFL mix61 + de-sized S2 glass
	ATLAS ECT + as received S2 glass
	ATLAS ECT + de-sized S2 glass