

LHC 高輝度化アップグレード超伝導磁石向け有機複合材料のガンマ線照射効果 2

Gamma ray irradiation effects on organic composite materials of superconducting magnets
for High Luminosity LHC upgrade 2

TAVARES Sandra¹⁾ SOUSA Daniela¹⁾ MUSSO Andrea¹⁾

中本 建志²⁾ 荻津 透²⁾ 池田 博²⁾

Tatsushi NAKAMOTO Toru OGITSU Hiroshi IKEDA

¹⁾CERN ²⁾高エネルギー加速器研究機構

（概要）HL-LHC 高輝度化アップグレード向け超伝導磁石への適用を判定するため、有機複合材料について目標 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。

キーワード： HL-LHC, 超伝導磁石, 有機複合材料

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。さらなる性能向上のため、超伝導磁石システムを新たにアップグレードし、加速器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』計画が進められている。しかし高輝度化とのトレードオフとして、ビーム衝突点からの二次放射線は飛躍的に増大し、超伝導コイルの吸収線量は 40 MGy にも達する。超伝導磁石の構成材料の中でも、樹脂を含む有機複合材料は放射線に対して最も敏感であり、磁石の寿命を実質的に決定する。したがって、10 年以上にわたる HL-LHC 加速器運転において超伝導磁石を安定して運用するためには、有機複合材料の耐放射線特性を正確に評価し、厳しい放射線環境に耐えられる材料をあらかじめ選定することが大変重要となる。従来から、有機複合材料に対して γ 線照射を行った研究は多くあるが、先端加速器用超伝導磁石部品向けの最新材料を対象とする研究は存在しない。本研究の目的は、HL-LHC 超伝導磁石で使用する予定の有機複合材料について、目標 100 MGy までの γ 線照射を行い、各種の特性評価試験を通して、材料の性能限界を実験的に検証することである。

2. 実施方法

高崎研コバルト 60 ガンマ線照射施設において、常温、空气中で最大 100 MGy までの照射を段階的、系統的に実施することを計画した。試料は、HL-LHC 超伝導磁石への採用を検討されている有機複合材料（樹脂及びガラス繊維強化プラスチック合計 8 種類）である。試料は非照射 (0)、10、20、30、40、50、100 MGy の 7 グループに分けて照射を行った。試料ホルダーには、高さ 100 mm、幅 15 mm のスロットが横方向に 18 スロット、高さ方向に 2 段、合計 36 セット配置されており、各段に目標線量グループ毎の試料を装荷できる。通常 1 スロットに同一種の試料 8 枚を装荷する。試料交換毎に試料ホルダーの正面と背面に最大 20 枚の PMMA 線量計 (Radix W) を取り付けて 1 時間の線量率測定を実施し、ほぼ均一の空間線量率であることを確認した。照射後の試料は、CERN に送られ、各種特性を測定した。

3. 結果及び考察、今後の展開等

図 1 から図 3 に、それぞれ 3 点曲げ強度、層間せん断強度、シャルピー衝撃強さ及びガラス転移温度 (DSC 法) の測定結果を示す。図 1 と図 2 の結果を見ると、汎用エポキシ樹脂である Araldite F が放射線に対して極めて感受性が高く、10 MGy 程度でも著しく特性が劣化することがわかった。一方、シアネート樹脂が主成分の CTD425、BTS2 及び Rikalite は、共通して高いレベルの耐放射線性能を有することが確認できた。HL-LHC 向け超伝導磁石の中でも、高磁場磁石に採用される Nb₃Sn 超伝導コイルは化合物であるため脆く、CTD101K で樹脂含浸されることで機械強化されている。図 3 の結果を見ると、CTD101K は照射線量の増加に伴い靱性が減少しており、特に 77 K での試験においては、50 MGy では非照射の約 40% まで低下している。このことから、加速器の長期運転による放射線で樹脂にクラックが生じ、含浸コイルの機械強度が損なわれる可能性もあるため、低靱性樹脂を用いたモデルコイルによる検証試験が必要と考えている。なお、2018 年度と 2019 年度を通して、最大照射量は 84 MGy だった。このため 2020 年度以降も、目標の 100 MGy を目指して照射試験を継続する予定である。

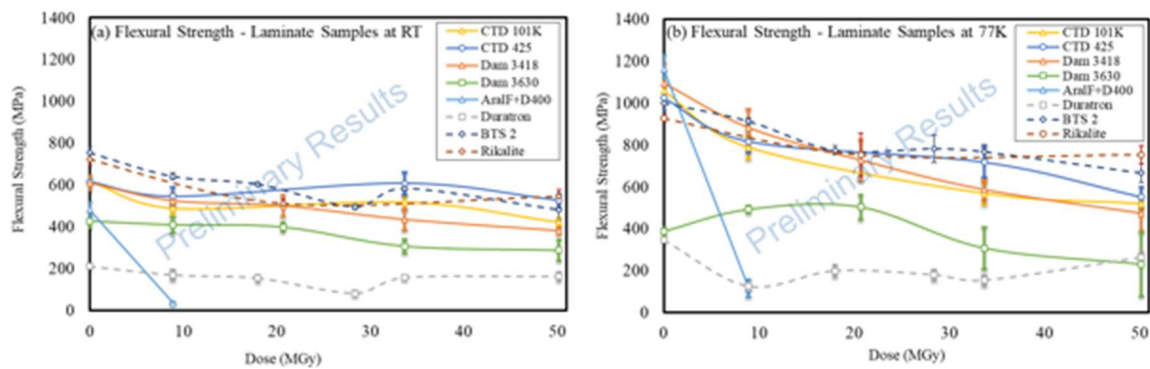


図1 3点曲げ強度の照射量依存性 (EN ISO 178:2010)。試験は (a) 常温、(b) 77 K で実施。

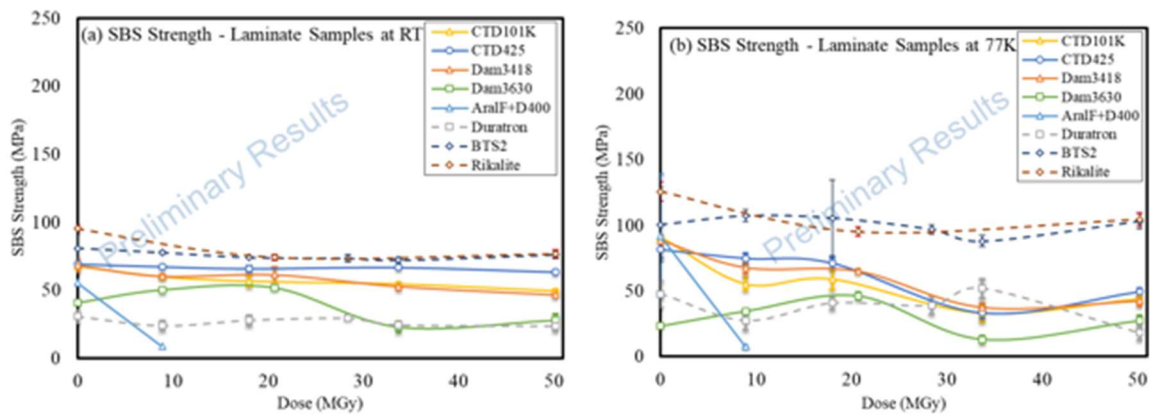


図2 層間せん断強度の照射量依存性 (ASTM D2344)。試験は (a) 常温、(b) 77 K で実施。

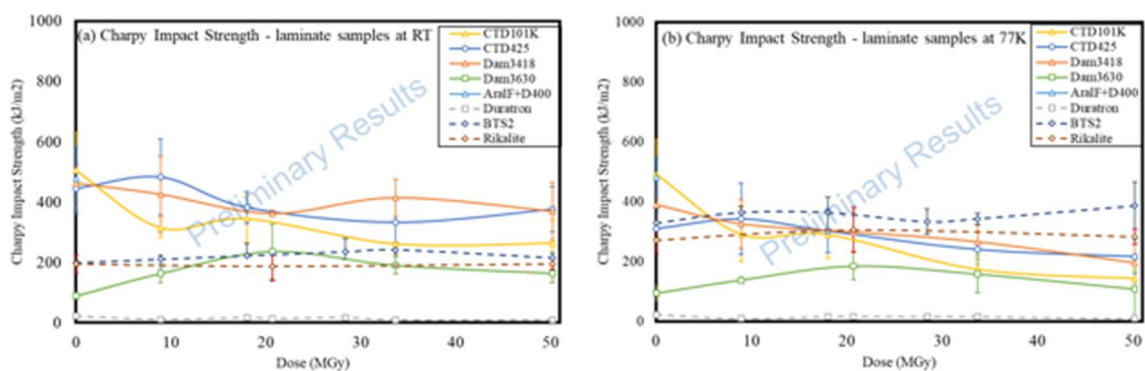


図3 シャルピー衝撃強さの照射量依存性 (EN ISO 179-1:2000)。試験は (a) 常温、(b) 77 K で実施。