

トポロジー最適化によるヘリカル型核融合炉マグネットシステムの設計と健全性解析 Analysis of magnet system in helical fusion reactors designed with topology optimization

田村 仁^{1,2}、後藤拓也^{1,2}、宮澤順一^{1,2}、田中照也¹、柳 長門^{1,2}
TAMURA Hitoshi^{1,2}, GOTO Takuya^{1,2}, MIYAZAWA Junichi^{1,2}, TANAKA Teruya^{1,2}, YANAGI Nagato^{1,2}

¹核融合研、²総研大
¹NIFS, ²SOKENDAI

核融合炉の超伝導マグネットには巨大な電磁力が発生する。発電実証を目指したヘリカル型核融合炉 FFHR-c1 (主半径 10.92m、プラズマ中心磁場 7.3T、マグネットの蓄積磁気エネルギー 160GJ) の場合、ヘリカルコイルに作用する電磁力は最大 120MN/m に達する。強大な電磁力を受けても応力や変形が許容値を超えないように、マグネットは強固な支持構造体によって支えられる。これまでに設計・製作された超伝導マグネットを使用する核融合実験装置の実績をもとにした外挿によれば、FFHR-c1 のマグネットは総重量が 20,000 トンを超えると予想されていた。一方で、材料調達、被冷却重量、廃炉後の放射化物削減といった観点から、マグネットは極力軽量化することが望まれる。軽量化を実現する設計方法として、トポロジー最適化技術を適用した設計が提案され、予想よりも大幅に軽量化された新しい構造が見いだされた。従来の設計と比較すると、数千トンの重量削減となる 25%以上の軽量化(Fig. 1,2)が健全性の保証とともに実現可能となった[1]。

トポロジー最適化された形状は、見た目として空孔や減肉が多いため、通常の励磁運転では健全でも、地震などの異常な負荷に敏感であることが懸念される。実際、構造全体の固有振動解析では、10Hz 以下の振動モードが得られ(Fig. 3)、地震波との共振が危惧される。そこで、これまで発生した大震災級の地震波形から得られる応答加速度に対し、最も厳しい側の加速度エンベロープを仮定したモード重ね合わせ法によって構造物の健全性を評価した。計算結果から、マグネット重量を支える支持脚部で損傷が発生するがマグネット本体には大きな影響がないことが示された(Fig. 4)。さらに本体を設置する建屋に免震システムを採用すれば負荷は 1/200 程度まで軽減されると予想される。

Reference

[1] H. Tamura et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **1559** (2020) 012108.

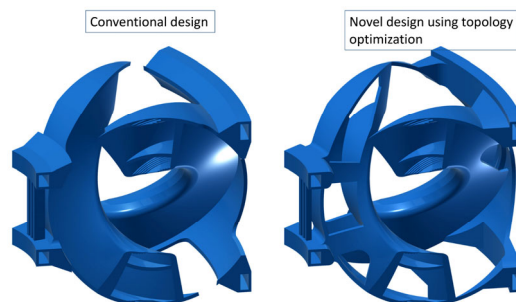


Fig. 1 Left: original model for FFHR-c1, right: topology optimized structure.

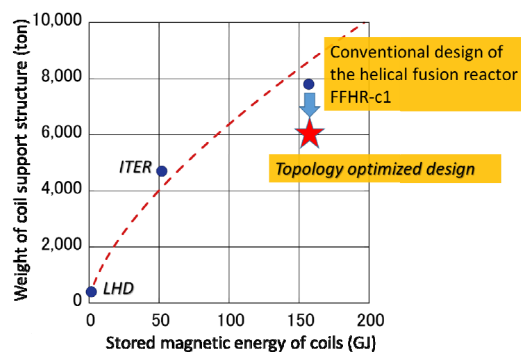


Fig. 2 Relationship between support weight and stored magnetic energy for a magnet in fusion reactor.

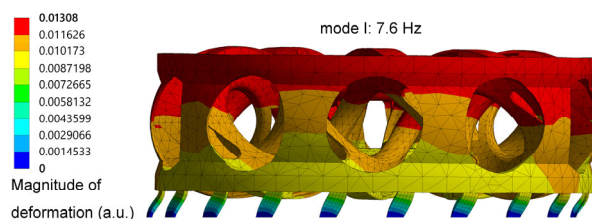


Fig. 3 Schematic of the first eigen vibration mode.

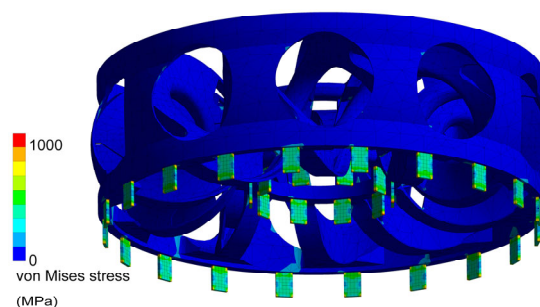


Fig. 4 Result of mode-superposition analysis.