

核融合炉用超伝導磁石絶縁材料の開発

大阪大学 産業科学研究所 西嶋茂宏

1. 緒 論

未来のエネルギー源として核融合の実現が望まれている。磁場閉じ込め型の核融合装置を考えると、磁場発生装置として超伝導磁石を使用することになるが、その放射線による性能劣化を見積もり、さらには耐放射線性を有する構成材料を開発する必要がある。超伝導磁石の構成要素の中で最も放射線に対して敏感なものは絶縁材料として使用される有機複合材料である。従って、耐放射線性を有する有機複合材料を開発することが核融合炉用超伝導磁石材料の開発の中でも大きな目標の一つになっている。ここでは耐放射線性を有する有機複合材料の開発の検討結果を報告する。

2. 照射劣化の機構

耐放射線性を有するガラス繊維強化複合材料(以下 GFRP)を開発するに当たり、その放射線による劣化機構を解明しておく必要があった。特にその機械的性質の劣化が問題になるが、その劣化

現象については統一的な解釈や、定量的な予測は立てられなかった。解釈を容易にするために曲げ試験を考える。図1 (a)に曲げ試験の際の曲げ応力と剪断応力の分布を示す。 σ が引張強度に達したときに引張破壊(曲げ破壊)が起こり、 τ が剪断強度に達したときに剪断破壊が起きる。曲げ、剪断破壊が起きるときの荷重 P_0 、 P_T をスパン幅 L に対してプロットすると (b)のようになる。 P_0 が P_T より下にくる領域では引張破壊を生ずるが逆に P_T が P_0 の下にくるような領域では剪断破壊を起こす。

ここで放射線による σ と τ の変化を考える。 σ は繊維強度によって決定されるのでほとんど吸収線量によって変化しない。一方 τ はマトリックスの反映する性質(層間剪断強度、以下 ILSS)なので線量によって劣化していくものと考えられる。すなわち P_0 は変化しないが、 P_T は劣化していく。さて、照射前に曲げ破壊を起こす領域で試験

していても、照射線量が増加すると P_T が下がっていき、引張破壊から剪断破壊に遷移していくものと考えられる。従ってこの破壊モードの変化を無視して曲げ強度を求めても正確な値は求められない。すなわち、有機複合材料の照射劣化の本質は、ILSSの劣化であり、これが破壊モードの変化を引き起こし、巨視的照射劣化するものである。

この考察は耐放射線性を有する有機複合材料を開発するために、大きな指針を与えた。すな

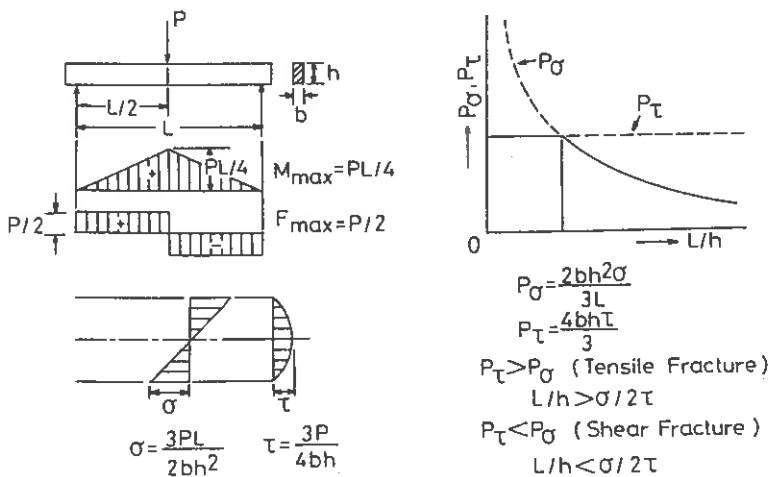


図1. 曲げ試験における応力分布及び曲げ破壊荷重と剪断破壊荷重のスパン依存性 (a) 曲げ試験における試料内の応力分布 (b) 曲げ及び剪断破壊する条件

わち、照射劣化を起こさない材料を開発するためには、ILSS の劣化を起こさない材料を設計製作すれば良いことが明らかになったのである。

3. 耐放射線性有機複合材料の開発

3.1 線質効果

図2に ILSS の照射による劣化のようすについて示した。

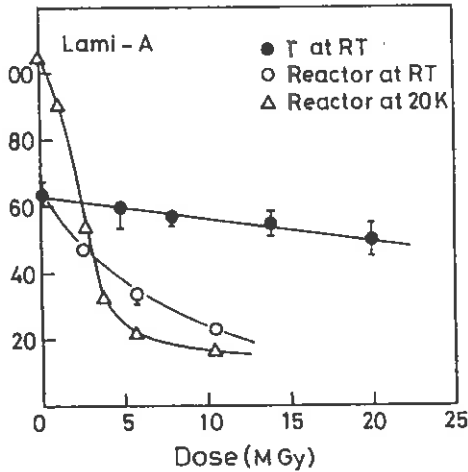
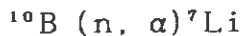


図2. ILSS のγ線及び原子炉照射効果の比較

図には、室温γ線照射-室温試験、20K 原子炉照射-液体窒素温度試験、及び360K原子炉照射-室温試験の3種類の結果について示した。また中性子フルエンスは吸収線量に換算した。ILSS の劣化はγ線による照射に比較し原子炉照射が著しいことが見て取れる。この差が生じる原因を、E-ガラス中のホウ素 (B₂O₃の形態でガラス繊維中に約8~13重量%含まれる) が熱中性子と



の核反応を起こすことが原因と考えられた。つまりこの反応に伴うα粒子が材料劣化を助長すると考えたのである。

上述の考察を実証するために、ホウ素の含有量が少ないT-ガラスを強化材にした GFRP (以後 TGFRP と呼ぶ) を製作し、EGFRP と原子炉照射効果を比較することとした。

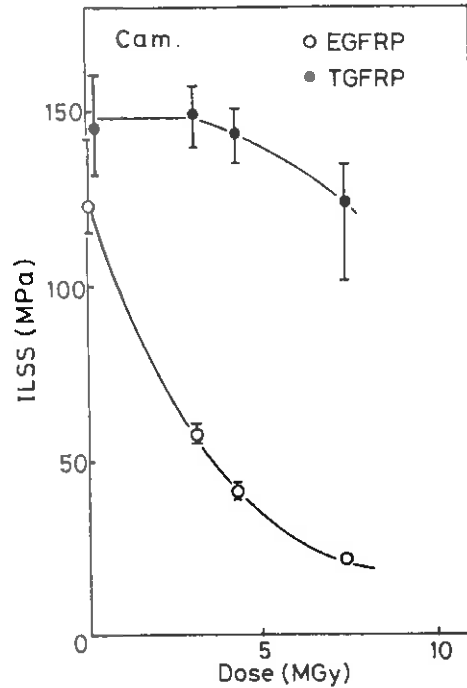


図3. ホウ素フリーガラス繊維強化 FRP (TGFRP) と従来材 (EGFRP) の ILSS の原子炉照射効果

図3に ILSS の照射劣化の線量依存性を示した。図中、黒丸印は TGFRP、白丸はEGFRP の試料である。ILSS は、T-ガラスを使用した試料では劣化の程度が低く、E-ガラスを使用した試料では劣化が大きいことが見て取れ、上述の考察が正しいことが実証されたといえる。すなわち、中性子環境下では、通常のE-ガラスを使用せず、ホウ素フリーのガラス繊維を使用することで耐放射線性を向上させ得ることが実証できた。

3.2 耐放射線性マトリックス

耐放射線性の高分子材料については各種の知見があるが、それらの材料が複合材料のマトリックスとして成立するとは限らない。このため簡便で、かつ、見通しのつく材料のスクリーニング法が求められていた。耐放射線性を有するマトリックスの使用も ILSS の劣化を防ぐ一つの方法である。そこで、マトリックス樹脂の照射によるスウェリング量を指標にすることを考案した。

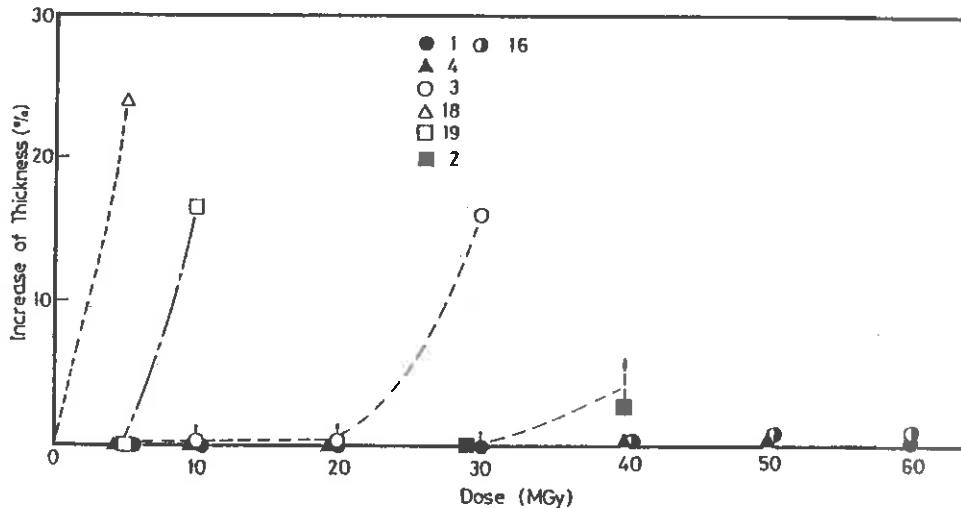


図4. マトリックス樹脂の電子線照射によるスウェリング

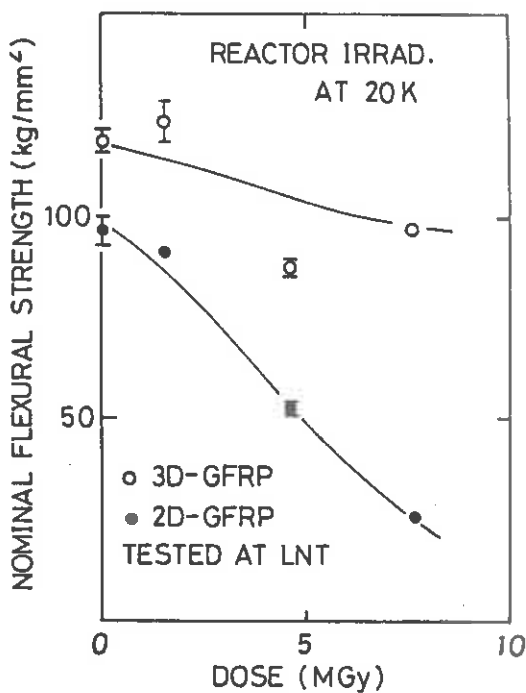


図5. 三次元繊維強化有機複合材料と二次元繊維強化有機複合材料の原子炉照射による公称曲げ強度の劣化による

図4に各種材料を電子線照射して、そのスウェリング量を測定した結果を示す。ある材料ではスウェリング量は大きく、この種の材料を使用するとスウェリングにより大きな強度劣化が予測される。スウェリング量の多いマトリックスを有するGFRPでは、耐放射線性が劣ることも確認した。このような簡便な実験で耐放射線性を有するマト

リックスを選択することができることが明らかになり、実際に本手法を用いて材料選択を行なった。

3. 3 三次元繊維強化有機複合材料

GFRP から層間に相当する部分を無くした複合材料も耐放射線性を有する材料となることが予測された。つまり三次元繊維で強化した複合材料(以後3DGFRP)である。図5に公称曲げ強度の照射劣化の様子を3DGFRPと従来材料とを比較して示した。ここで公称曲げ強度とは破壊モードの変化を考えず、梁理論から曲げ強度を求めた値である。

この図から明らかなように公称曲げ強度は従来材料と比較して、3DGFRPは耐放射線性を有することが理解できる。これは3DGFRPは照射を受けても剪断破壊しにくいことが理由である。

4. 結 論

核融合炉用超伝導磁石絶縁材料として耐放射線性を向上させたGFRPを開発する目的で、照射劣化の機構を明らかにした。またその機構に基づき耐放射線性を有する材料を開発する方法について検討した。この検討結果の一部は、核融合炉用超伝導磁石絶縁材料の設計指針として使用されている。