

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 核融合用超伝導磁石有機絶縁材料の機械的性質に及ぼす放射線照射効果：極低温におけるFRPの照射下ク<br>リープ   |
| Author(s)    | 西浦, 徹也  |
| Citation     | 大阪大学, 1998, 博士論文  |
| Version Type |   |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/41181">https://hdl.handle.net/11094/41181</a>   |
| rights       |   |
| Note         | 著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。 |

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

|            |   |         |         |        |
|------------|---|---------|---------|--------|
| 氏 名        | にし<br>西   | うら<br>浦 | てつ<br>徹 | や<br>也 |
| 博士の専攻分野の名称 | 博 士 (工 学)   |         |         |        |
| 学位記番号      | 第 14009 号   |         |         |        |
| 学位授与年月日    | 平成10年4月3日   |         |         |        |
| 学位授与の要件    | 学位規則第4条第2項該当  |         |         |        |
| 学位論文名      | 核融合用超伝導磁石有機絶縁材料の機械的性質に及ぼす放射線照射効果<br>一極低温におけるFRPの照射下クリープ |         |         |        |
| 論文審査委員     | (主査)<br>教授  | 岡田 東一   |         |        |
|            | (副査)<br>教授  | 田川 精一   | 教授      | 桂 正弘   |

## 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、核融合用超伝導磁石有機絶縁材料の機械的性質に及ぼす放射線照射効果を研究対象とし、特に極低温におけるFRP (Fiber Reinforced Plastics) の照射下クリープ挙動に関する研究を行っている。

第1章では、核融合炉の実現のために必要な超伝導マグネット技術の内、その構成材料である有機材料およびFRPの機械的性質に注目し、その特性に及ぼす放射線照射効果について調べ、特に微視的な破壊過程とこれに及ぼす放射線照射効果の評価、さらに、FRPの照射下クリープを解明することを目的とし、研究が行われた経緯を述べている。

第2章では、核融合用超伝導磁石に用いられる可能性が高いエポキシ樹脂及びそれを母材とするFRPの機械的性質に及ぼす放射線照射効果を解明するために、有機材料単体やFRP材料の各種の機械試験を行っている。その結果、照射材においては、FRP及びエポキシ樹脂の双方共、強度の低下や、破壊伸びの変化が認められるが、弾性率の変化が少ない事を確認している。また、FRPでは、破壊挙動から、白濁、層間剝離、繊維の引き抜け等、微視的破壊が線量の増加に伴い増加する事、層間の破壊様式によって破壊が母材中または界面破壊と変化する事を示し、このような微視的破壊の変化をAE (Acoustic Emission) によって検知できる事を明らかにしている。

第3章では、極低温における照射下クリープについて調べ、エポキシ樹脂及びポリエチレンは、照射下においてはクリープ変形が増加する事、及びFRPにおいてもクリープ変形及びリラクセーションの増加が認められる事を確認し、照射下クリープが熱硬化性樹脂及び熱可塑性樹脂の双方で同様な挙動を示すことを明らかにしている。また、照射下における機械的性質を評価するためにリラクセーションを利用した簡便法を提案している。

第4章では、照射下クリープのメカニズムを検討している。まず、放射線照射による分子的な構造変化を評価するために、粘弾性試験、スエリング測定、ESR測定を行い照射下における応力 (歪み) 条件下では分子鎖破断が増加していることを確認している。これらの結果に基づいて、照射下クリープのメカニズムとして、分子鎖切断の再結合をもたらす周囲の分子の拘束 (籠効果) が応力によって減少するというモデルを提案している。また、上記メカニズムに基づいて分子モデルを構築し、計算機実験を行った結果、実験結果と定性的に合う事を確認している。

第5章で以上を総括し、核融合用超伝導磁石の有機絶縁材料においては、照射下におけるクリープやリラクセーシ

ヨンの評価のような、放射線照射中の機械的性質のデータを蓄積することが急務であることを示し、従来の照射後材料の評価のみでなく、照射下での特性評価が必要である事を示唆し、今後の核融合用構成材料に関する材料評価の指針を示している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は核反応プラズマを閉じ込めるための超伝導磁石用有機複合材料の機械的性質に及ぼす放射線照射効果、特に照射下クリープ挙動に関する実験的研究をまとめたものでその成果を要約すると次の通りである。

1) 放射線照射されたFRPの機械的特性の変化や破面形態の特性を明らかにし、耐放射線性のFRP材料の開発・設計の指針を与えている。すなわち、FRPの放射線照射下における破壊挙動を系統的に調べ、線量と強度変化との関係、破壊モードと破面形態との対応、及び線量と破面変化との対応を明らかにしている。

また、FRPの機械的性質の放射線照射にともなう劣化をAE法によって監視する事が可能であることを明らかにしている。すなわち、FRPでは、白濁面積、層間剥離の大きさ、あるいは繊維の引抜長さが、0~10 MGyまでの線量の増加にともなって、それぞれ、約10~22倍増加し、このとき検出されるAE事象数が約16倍に増加していることを確認し、両者に対応関係が認められ、このような微視的破壊の増加をAE計測によって検出することが可能であることを明らかにしている。

さらに、FRPやエポキシ樹脂単体の照射材では強度や伸びの劣化が観測されるが、弾性率の変化は大きくなく、照射材の特性だけによって、照射下クリープの挙動を説明することは困難であることを示している。

2) 液体窒素温度における照射下クリープにおいては、母材樹脂およびFRP材料の変形が照射材の変形よりも大きくなることを明らかにしている。すなわち、エポキシ樹脂やFRP等の実用材の照射下クリープでは、クリープ速度は、荷重及び線量が等しい場合には、約2桁大きくなることを確認している。液体窒素温度下で電子線照射中の定常領域のクリープ速度は、エポキシ樹脂で $26.1 \times 10^{-6} \text{ (MPa} \times \text{MGy)}^{-1}$ 、FRPで $39.5 \times 10^{-8} \text{ (MPa} \times \text{MGy)}^{-1}$ を得ている。応力が100 MPaで10 MGyの照射線量では、歪み量はエポキシ樹脂で2.61%、またFRPで0.04%に達する。ITERの中心ソレノイドコイル(CSコイル)では、コイル径方向の絶縁材の総厚さは72 mmであり、エポキシ樹脂では1.88 mmの変位、FRPでは0.03 mmの変位がクリープで生じる事になる。これはCSコイルの成型時の精度が $\pm 1.5 \text{ mm}$ である事から、エポキシ樹脂ではコイルの要求精度を越えて変形する事を明確にしている。

3) 低温における照射下の機械的性質を評価する新しい試験方法を提案している。すなわち、リラクセーション試験後の残留歪を測定することにより、リラクセーションを評価できることを明らかにしている。

4) 低温における照射下クリープは、放射線照射された高分子鎖の切断反応が増加する事であり、この理由として、周囲の分子鎖の拘束によって回復し再結合するという効果(籠効果)が、応力負荷によって減少するというメカニズムを支持する結果を得ている。すなわち、粘弾性測定やスエリング測定によって、架橋間分子量の増大が確認され、さらに架橋切断のG値も応力下照射によって増加すること、さらに、ESR測定から、照射下クリープでは照射材よりもラジカルが多く観測されていることから、劣化加速のメカニズムは、架橋間分子の切断反応が加速されるためであり、籠効果の消失を示す結果を得ている。

5) また、このメカニズムに立脚した分子鎖モデルを構築し、計算機実験を行った結果が、実験結果と定性的に合う事から、メカニズムの妥当性を明らかにしている。

以上のように本論文は、低温、高応力、放射線下、特に応力と放射線が同時に作用するという、過酷な条件下で使用される、核融合用超伝導磁石構成材としての有機絶縁材料の開発・設計の指針を材料科学的な立場から明らかにしたもので、核融合工学、低温材料学、放射線化学に寄与するところが大きい。よって、本論文は、博士論文として価値あるものと認める。