JP0250412

JAERI-Tech
2002-077

核融合炉用無機絶縁ケーブルの中性子照射効果に関する研究（委託研究）

2002年9月

飯田　敏行*・田中　照也*・佐藤　文信*
落合　謙太郎・西谷　健夫

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

編集兼発行　　日本原子力研究所

JAERI-Tech 2002-077

核融合炉用無機絶縁ケーブルの中性子照射効果に関する研究
（委託研究）

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部
飯田　敏行*・田中　照也**・佐藤　文信*・落合　謙太郎・西谷　健夫

（2002年7月18日受理）

核融合診断系の設計のために、中性子照射下における電気絶縁材料の過渡的な特性低下の問題が注目されている。本研究では、酸化マグネシウムを絶縁体とした同軸型無機絶縁（MI）ケーブルの14MeV中性子照射下における電気的特性の変化について調べている。14MeV中性子照射実験は日本原子力研究所FNS施設において実施した。MIケーブルの芯線-シース間の漏れ電流の変化を中性子誘起伝導の効果として測定した。中性子誘起電流は芯線-シース間電圧および中性子フラックスにほぼ比例して増加した。また、中性子フラックスが大きく変化する時に大きな誘起電流が過渡的に発生することや、芯線とシースが同電位である場合にも誘起電流が生ずることを観測した。これらの現象は、ケーブル絶縁層内に電荷蓄積が起こっていることやそれに伴う分極効果が複雑にケーブルの電気伝導特性に影響していることを示唆している。また、放射線誘起伝導の機構を調べるために行った^{60}Co-γ線照射実験およびパルスX線照射実験の結果と若干の考察を述べている。

本研究は、日本原子力研究所の平成13年度委託研究（一部平成13年度課題募集型協力研究の成果を含む）により実施した研究の成果である。
那珂研究所（東海駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
*　大阪大学
**　核融合科学研究所

Study of Neutron Irradiation Effects on Mineral Insulated Cables for Fusion Reactors (Contract Research)

Toshiyuki IIDA*, Teruya TANAKA**, Fuminobu SATO*, Kentaro OCHIAI and Takeo NISHITANI

Department of Fusion Engineering Research
(Tokai Site)
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 18, 2002)

Transient degradation of electrical properties of insulation materials caused by neutron irradiation becomes one of the important subjects in design of fusion diagnostic systems. In the present study, the change of electrical properties of mineral insulated (MI) cables under 14 MeV neutron irradiation was examined at FNS (Fusion Neutronics Source) facility of JAERI. The MI cables had coaxial structure with an insulating layer of magnesium oxide. The increase in leakage current flowing into the central wire was measured as the effect of the neutron-induced conduction. The neutron-induced current was almost proportional to the neutron flux and the bias voltage between the sheath and central wire. Also, transient large leakage current was observed at the start and stop of the irradiation. The induced current was observed even for the bias voltage of 0 V. These results imply the complex conduction mechanism caused by the charge accumulation and subsequent space charge effect. In addition, the present report describes results and some discussion on gamma-ray and pulsed X-ray irradiation experiments performed to examine the mechanism of the radiation-induced current.

Keywords: Mineral Insulated Cable, Neutron Irradiation Effect, Ceramics Insulator, Fusion Reactor, Radiation Induced Conductivity, ^{60}Co γ-ray, Pulsed X-ray, FNS

This research was supported by the JAERI's Contract Research in 2001.

* Osaka University

** National Institute for Fusion Science

目　次

Contents

1．緒言

地球規模でのエネルギー枯渇の問題が重要視されるなかで、環境にできるだけ影響を及ぼさない、環境負荷の小さいクリーンなエネルギー源の開発が望まれている。現在、クリーンなエネルギー源として、風力発電、太陽光発電、水素と酸素を反応させて電気と水を生成する燃料電池が、次世代の分散型エネルギー源として大いに期待されている。しかし、いずれも小規模なエネルギー源であり、社会の基盤エネルギー源としての位置を占めるには遠く及ばない。

現在、将来の大型エネルギー源として目されているのが核融合炉である。重水素(D)とトリチウム(T)の核融合反応によって発生する膨大なエネルギーを利用するものであり、核分裂炉のように核分裂生成物等の大量の放射性廃棄物を生成しない点でよりクリーンな大規模エネルギー源となりうる。

D-T 核融合炉では、主要構造材料だけでなく、電気系材料、光学系材料、より複雑で精密な構造を有する診断系材料など、非常に多岐にわたる各種の機能材料が利用される。しかし、核融合炉環境においては D-T 核融合反応によりエネルギーの源である大量の 14MeV 中性子が発生し、その結果、炉心プラズマを取りまく様々な材料や制御機器が大線量の中性子の照射にさらされることになる。そのため、核融合炉を構成する各種の構造材料、機能材料が中性子照射損傷により、重大な特性劣化や機能の低下が引き起こされることになる。核融合炉開発において、中性子照射損傷の研究が最重要課題の一つとなっている理由である [1]。

材料が中性子に曝され、材料の構成原子に中性子の大きなエネルギーが付与されると、非常に短い時間の間に材料中に多くの構造的欠陥が作られる。また、同時に、材料内部に中性子核反応で生成される高エネルギー粒子と固体原子との相互作用によってそのエネルギーが周囲に伝搬していく。この時に材料に誘起されるダイナミックな特性変化は、これまでの定常的な放射線照射効果のデータとは非常に異なっていると考えられる。このような 14MeV 中性子照射下での材料の過渡的な特性変化一いわゆる動的照射効果の注目例に、高線量率中性子照射下で、セラミックス絶縁材料の電気絶縁性が非常に低下する現象がある [1-7]。

優れた絶縁材料として多種多様の用途に利用されているセラミックスは、一般の金属とは異なり、常温では電子がすべて価電子帯に存在し、格子原子との強い結合のために自由に移動することが出来ない。このため、セラミックスは電気を通すことは無く高い絶縁性を保っている。しかし、このようなセラミックスが中性子等の放射線に曝されると、放射線の電離作用により価電子帯の電子が伝導帯へ励起され、その結果、電界が存在すれば絶縁体においてもかなりの電流が流れるようになる。しかし、励起された電子は、格子原子との強い相互作用のために寿命時間は非常に短く、セラミックスの導電性は放射線照射中にのみ現れ、放射線が無くなれば絶縁性が回復する。

現在計画中の国際熱核融合実験炉(ITER)では、最も中性子線量率が高くなる第一壁近傍では中性子フラックスが 1.0×10^{14} n/cm^2/sec にも及ぶ。そのような状況下で、セラミックス等の電気絶縁材の機能が十分確保されるかどうかが危惧されている。セラミックスの電気的性質についての中性子照射効果、特に動的照射効果に関するデータが非常に重要となっている。

既に述べたように、セラミックス絶縁材料の 14MeV 中性子誘起電気伝導は中性子照射中にのみ現れる現象であり、この現象の正確な評価を行うためにはその場(in-situ)測定の実験技術が必要である。そしてまた、中性子誘起電気伝導によって生ずる電流は一般に小さく、この微少電流を中性子照射下で正確に測定するのはそれほど容易ではない。照射試料以外の信号を伝えるケーブルや測定系そのものが、中性子照射をうけるために中性子誘起電流が発生し、照射試料を流れる正確な中性子誘起電流が計測出来ない恐れがある。従って、この中性子誘起電気伝導現象を観測するためには、上記のバックグラウンド電流を極力抑えた実験・測定システムを製作することが非常に重要である。

本研究では、照射試料として、高純度サファイア等のセラミック絶縁材結晶、更にセラミックスを絶縁材として用いた実用ケーブルー無機絶縁(MI)ケーブルを用意した。そして、その場観察用の微少電流測定装置を製作するとともに、上記試料の 14MeV 中性子照射下での電気的特性について測定し、セラミックス絶縁材料の 14MeV 中性子誘起電気伝導効果について調べることを目指している。

具体的には 14MeV 中性子照射下でのセラミックス試料や MI ケーブル試料の電圧−電流特性と中性子フラックスとの関係の測定を行い、その結果から絶縁体の中性子誘起電気伝導の機構についての考察を行っている。また、14MeV 中性子照射実験だけにとどまらず、^{60}Co−γ 線照射実験、パルス X 線照射実験も併せて行い、セラミックスの放射線照射誘起電気伝導の一般的特性について考察している。

本報告の内容は以下のとおりである。

第2章では、本研究で調べたセラミック試料や MI ケーブルの特性とその場測定システムについて説明し、さらに 14MeV 中性子照射照射実験とその結果について述べている。

第3章では、MI ケーブルの ^{60}Co−γ 線源を利用したγ線照射実験及びパルス X 線照射実験の結果について述べ、ケーブルのγ線、X 線誘起電気伝導について考察している。

第4章では、本研究におけるまとめを述べている。

2. 無機絶縁ケーブルの中性子照射実験

2.1 はじめに

セラミックスはその優れた電気絶縁性のために、各種の電気機器に電気絶縁材料として幅広く利用されている。核融合炉用の電気絶縁材としても随所に用いられる。しかし、第 1 章で述べたように、D-T 核融合炉環境のような高線量率放射線場においてはセラミックス絶縁材の電気絶縁性の低下が問題となる恐れが大きい。セラミックスの放射線誘起電気伝導現象、特に高線量率で、高エネルギー粒子が発生する D-T 核融合炉環境では、この電気伝導現象が大きな問題になると考えられる。高線量率中性子場における絶縁材料の機能低下に関する実用データの収集と、絶縁性低下機構の解明が非常に重要である。

この章では、先ず、電気絶縁材料としてのセラミックスの物性とセラミックスを絶縁材に用いた MI ケーブルについて簡単に述べる。次ぎに、放射線照射による絶縁体の誘起電気伝導現象について説明する。さらに、14MeV 中性子照射実験施設と、筆者のグループが以前に行ってきたセラミックスの電気絶縁性低下についてのいくつかの実験結果について述べる。そして最後に、本研究で実施した MI ケーブルについての DT 及び DD 核融合中性子照射実験の詳細と実験結果について述べる。

2.2 セラミックス電気絶縁材料と MI ケーブル

表 2.1 に、代表的なセラミックスの種類とその組成を示している。セラミックスには酸化物、炭化物、窒化物、ホウ化物など材質の範囲は非常に広く、構成物質や製造方法により様々な機能を持たせることが出来る。特に精密に作られたセラミックスは、陶磁器やレンガなどと区別され「ファインセラミックス」と呼ばれている。

セラミックスの物理的性質は、構成原子、分子、イオン等の間に働いている結合の特性を反映しており、大きく分けてイオン結合性、共有結合性、金属結合性とに分類する事が出来る。そして、電気的性質に関してはそれぞれ次のような性質を持っている。イオン結合性セラミックスでは電子が負のイオンに強く捉えられているので絶縁体となる。また、共有結合性セラミックスでもイオン結合性ほどではないものの、電子が局在化しており、電気的には絶縁体である。金属結合性セラミックスは原子の電気陰性度が小さく、電子を放出して陽イオンになり、その電子も他の陽イオンに捉えられることなく固体全体に統計的に存在するので、高い導電性を示す。一般にセラミックスは絶縁材料としてよく利用されていることが知られているが、このようにセラミックスが全て絶縁物であるというわけではない。

これまでも照射実験用試料として用いてきた高純度サファイアは、化学組成が Al2O3、結晶構造が六方晶系の共有結合性の高いセラミックスであり、非常に高い絶縁性を持っている。表 2.2 にサファイアの代表的な性質を示す。

今回のセラミックス絶縁材の中性子照射実験用試料には無機物絶縁(Mineral Insulated, MI)ケーブルを使用した。MI ケーブルは、ステンレス製の外側シースと中心線の間に高純度のアルミナやマグネシア等のセラミックスの粉末を絶縁物として充填したケーブルである。シース内では中心線がエアギャップ無く封入され、また、端末は完全密封処理され酸化等による劣化が起こらないようにしている。現在、最も耐放射線性、耐熱性、さらに機械的強度に優れたケーブルであり、原子炉施設等の苛酷環境に用いられている [8-10]。本研究の照射試料として用いた MI ケーブルの構造を図 2.1 に示す。

2.3 セラミックス絶縁体の放射線誘起電気伝導

物質の電気的性質を説明するのにバンド理論がよく用いられる。すなわち、物質にはエネルギーの観点から、電子の存在できるエネルギー帯(許容帯)と存在できないエネルギー帯(禁止帯)がある。そして、禁止帯が電子の熱的エネルギーよりも大きなエネルギーギャップをもち、かつ電子の存在確率が 1/2 となるエネルギーレベル(フェルミレベル)がその中心付近にあるとき、物質は絶縁体となる。一方、物質中の不純物や欠陥等が禁止帯中にエネルギー準位を形成し、フェルミレベルが許容帯の近くにあるときには、物質に導電性が現れ、半導体となる。

表 2.3 に、代表的なセラミックスのエネルギーギャップを示す。この表から分かるように、サファイア等の電気絶縁性に優れている物質はエネルギーギャップが非常に大きく、電子は熱的エネルギーだけでは伝導帯へ遷移出来ない。約 8eV 以上のバンドギャップは光の吸収波長に換算すると紫外線に対応し、通常の環境下では、これらのセラミックスは高い電気絶縁性を保っている。

高エネルギー粒子が本質である放射線は、このバンドギャップを越えるエネルギーを電子に与えることができる。放射線によりエネルギーを付与された電子は伝導帯へ遷移することにより、絶縁体にも導電性が与えられることになる。これが、放射線誘起電気伝導の起源である。

14MeV 中性子誘起電気伝導に関してもう少し説明を加える。例えば、アルミナ絶縁体に入射した 14MeV 中性子は、アルミナ中の酸素原子およびアルミニウム原子と衝突して核反応を起こす。そして、標的原子核の反跳原子と 2 次中性子や γ 線、あるいは高エネルギー荷電粒子を生成する。2 次中性子や γ 線も引き続き対象物質と相互作用し、種々の荷電粒子を生成する。これらの過程で生成した荷電粒子は周囲の原子を電離しながら固体中を進んでいく。このときの電離作用により電子が伝導帯へ励起される。照射試料中ではバイアス電

界により電子が動することにより電流として観測されることになる。

アルミナ中の酸素原子核およびアルミニウム原子核と14MeV中性子核反応の種類と断面積をそれぞれ図 2.2、2.3 に示している。

2.4 核融合中性子発生装置

中性子照射実験は、日本原子力研究所核融合中性子発生装置FNS(Fusion Neutron Source)を利用した。これらの中性子発生装置はコッククロフト型重陽子加速器で、重陽子ビームをトリチウムターゲットに照射し、D-T 核融合炉と同じ核融合反応により 14MeV 中性子を発生させる。図 2.4 は、FNS施設の鳥瞰図で、重陽子加速器、トリチウムターゲット、トリチウム処理装置及びその他の周辺装置から構成されている。重陽子加速器は 350kV の Cockcroft-Walton 型静電加速器で、加速された重陽子は第1または第2ターゲット室へ2つのビームラインによって導かれ、それぞれに最大中性子発生量 5×10^{11} 及び 3×10^{12} n/s のトリチウムターゲットが設置されている。本実験では主に中性子強度の大きい第2ターゲット室でおこなった。そして、最大 25mA の重陽子ビームをターゲットに照射して DT 中性子を発生させる。

図 2.5 は、FNS回転ターゲットアセンブリの概略図であり、トリチウムターゲットは水冷却および高速回転させるだけでなく、ターゲットアセンブリを上下に動かすことが可能で効率よく 14MeV 中性子照射をおこなうことができる。FNS加速器の概要を表 2.4 に示す。

2.5 中性子輸送計算による 14MeV 中性子照射場キャラクタリゼーション

ターゲットで D-T 核反応により 14MeV 中性子が発生すると同時にターゲット構造材で 14MeV 中性子の弾性、非弾性散乱により誘導 γ 線と 14MeV 以下の2次中性子が生じる。従って、試料の照射線量を正確に評価するためには、ターゲット近傍の中性子及び γ 線の線量分布を求める必要がある。この照射場解析のために中性子、γ 線輸送計算コード MCNP (Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport)と、構成元素の核反応断面積に JENDL-3 を用いて、ターゲット近傍の中性子と γ 線の線束及びエネルギースペクトルを計算した。

図 2.6 に MCNP とトリチウムターゲットモデルより計算された中性子発生点より前方 15mm 位置での中性子と γ 線エネルギースペクトルの計算結果を示している。MCNP コードのポイントエスティメータを用いて中性子 125 群、γ 線 40 群のエネルギービンでのスペクトル計算を行った。また、表 2.5 はターゲットから毎秒 3.0×10^{12} 個 DT 中性子が発生した時の全エネ

ルギー領域で積分した中性子とγ線の線束である。誘導γ線の影響も含めて、ターゲット近傍におけるγ線の粒子束は中性子に比べ、約1桁小さいことがわかる。

2.6 これまでの照射実験データ ― サファイアについて

2.6.1 実験方法と関連技術

中性子照射下でサファイア試料中を流れる電流を測定することが目的である。第 1 章の緒言でも述べたように、絶縁材料の中性子誘起電流観測のためのその場測定では、測定系そのものにも中性子曝露の影響があらわれる。そして、観測信号レベルも非常に小さく、正確な測定はそれほど容易ではない。例えば、試料からの信号を伝える信号線に通常の同軸ケーブルを用いると、14MeV 中性子の照射効果により同軸ケーブルの絶縁体内部に電荷が生成蓄積され、その電荷によりケーブル内に電界が生じる。そして、この電界に基づく漏れ電流が試料からの信号電流に重畳し、正確な測定を妨げることになる。

図 2.7、2.8 に照射試料の取り付け図と中性子誘起電流測定用の 4 チャンネル微小電流計の回路図を示す。高純度サファイア(京セラ製)試料は直径 10mm ϕ 、厚さは 0.5mm あるいは 0.1mm の円板状で、両面中央部には直径 5mm ϕ 、厚さ 0.15 μ mの金蒸着電極、周囲には幅 1mm のガードリング電極を設けている。この試料を、図 2.7 に示すように内壁に導電性塗料を塗り外壁を銅箔で覆ったアクリル製パイプの先端に取り付けている。信号電極からのリード線は、試料周囲の電気的条件を出来るだけ純粋にするために、アクリル製パイプの中央内部を真っ直ぐに通している。アクリル製パイプの長さは約 50cm で、信号電極からのリード線はパイプのもう一方の端で通常の同軸ケーブルと接続した。このアクリル製パイプは、試料が取り付けられている側を FNS 装置トリチウムターゲットの重陽子ビームスポット位置(中性子発生位置)に向け設置した。ビームスポット位置と試料との間の距離は約 20mm と十分近く、14MeV 中性子以外の散乱中性子の影響は無視出来る。このようにすることにより、同軸ケーブルが中性子発生源から遠くなり、ケーブル内の電荷蓄積とそれに基づく漏れ電流の影響を少なくすることができる。また、中性子発生位置に近いアクリルパイプ内では気体の電離が起こるが、内部には電界が無く、生成した電子やイオンは再結合で消滅し、試料電流への影響を十分小さくできる。さらに、高電圧電極からの試料表面漏れ電流は、アクリルパイプ内部をアースさせることにより試料電流への影響を小さくしている。

試料の中性子照射誘起電流、バイアス電源からの出力電流(=試料の高圧電極への流入電流)、中性子線量率測定用の電離箱電流等を同時に測定出来るように、4 チャンネルの微少電流計を製作した。この電流計は 1pA 以上の電流を測定でき、4 チャンネルのうちの 1 つは、バイアス電圧の設定が可能である。これらの微少電流計を PC と接続し、計測データ

はすべてPCでモニタできるようにしている。

2.6.2 14MeV 中性子照射実験結果

今回のMIケーブルに関する照射実験を実施するにあたり、これまでに行ってきたセラミックス(サファイア)試料の中性子照射実験の結果を簡単にまとめておく[11]。

サファイア試料には中性子照射開始直後に大きな過渡電流が流れ、その後ゆっくりと誘起電流が減り、やがて定常状態に落ち着く応答となった。また、照射停止後も、誘起電流はゆっくりした速度で減少した。さらに、照射停止後時間を置いて再び同じ線量率の中性子を照射したところ、最初に比べて小さな過渡電流が観測された。中性子による誘導γ線の寄与については、中性子フラックスと空気電離箱からの信号との比較から判断することができる。この実験においては、照射場の放射線種はほとんど14MeV中性子であり、中性子の放射化による誘導γ線の影響は十分小さいと考えられる。

14MeV中性子誘起電流の遅い応答の理由としては、次のようなことが考えられる。14MeV中性子反応により電離生成された電子はバイアス電圧電界により正電極に向かってドリフト移動する。これが誘起電流である。しかし、大半の電離電子は近傍の正孔と短時間で再結合する。また、いくらかの電子は再結合せず、サファイア中の格子欠陥や不純物トラップに一時的に捕獲される。そして、ある時間(平均捕獲寿命)が経過したのち、再び放出されバイアス電圧電界により誘起電流に寄与することになる。電子はこの過程を繰り返し、やがて正孔と再結合するかあるいは深い準位の欠陥トラップに捕獲される。このような機構が14MeV中性子に対して非常にゆっくりとした応答になっている原因と考えられる。

照射開始直後の大きな過渡電流については、電離による電荷の生成、再結合、捕獲・再放出等の過程の他に分極効果も寄与していると考えられる。種々の効果が絡まった複雑な応答になっていると考えられる。また、2度目の照射で過渡電流値が小さくなったことについては、サファイア試料中での分極効果を含む電荷蓄積の影響が考えられる。最初の照射において、試料中に多くの電荷が既に蓄積され、2度目の照射では消滅した成分のみによる効果が観測されるためと思われる。

サファイア試料の14MeV照射下における電流-電圧特性の例を図2.9に示している。サファイア中に流れる誘起電流はバイアス電圧に従ってほぼ一定の比例定数で増加しており、これは誘起電流が電荷キャリアの生成と移動に起因していることを示している。また、バイアス電圧が0Vの場合にも誘起電流が観測され、試料中に蓄積された(特に信号電極近傍)電荷により試料内部で電界が発生していると考えられる。

図2.10にサファイアの電気伝導度と14MeV中性子フラックスの関係を示している。バイアス電圧は10V、照射温度は室温である。これより誘起電流はサファイア試料に付与されたエネルギー、つまりサファイア試料中で生成される電荷量に依存していることがわかる。

2.7 DT 中性子照射実験

2.7.1 DT 中性子誘起伝導測定実験

図 2.11 に無機絶縁ケーブル(MI ケーブル)に対する中性子照射実験の概略図を示す。長さ約 2m の MI ケーブルをリング状に巻き、支持台に固定してトリチウムターゲットの前に設置した。リングの中心をビームラインの軸上に合わせてケーブル全体に均一な照射を行った。MI ケーブルのシースにバイアス電圧を印加し、中性子照射中の芯線に流れ込む漏れ電流を微小電流計により測定した。

使用した2種類の MI ケーブル(A、Bと名付ける)の寸法を図 2.12 に示す。用いた試料は市販のもので(助川電気製)、ステンレス製のシースと銅製の芯線を持つ同軸ケーブルである。シースと芯線の間には絶縁層として粉末状の酸化マグネシウム(MgO)が充填されており、ケーブルの両端はガラスにより密閉されている。中性子照射を行わない状態でのシース-芯線間の電気抵抗は $10^{13}\,\Omega$ 以上であった。

測定では、まず、中性子照射を行わない状態でバイアス電圧を印加して 15 分間おき、漏れ電流が定常状態に落ち着くのを確認した。その後、DT 中性子照射をおこない、漏れ電流の変化を中性子誘起伝導の効果として 15 分間測定した。実験中の中性子フラックスの変化は照射室内に設置されたウラン核分裂検出器の計数率変化によりモニターした。測定後は中性子照射を停止する。この測定を太さの異なる 2 種類の MI ケーブルA、Bに対して室温で繰り返し、漏れ電流の経時変化およびバイアス電圧や中性子フラックスとの関係を調べた。

2.7.2 フラックス変化に伴う過渡応答

図 2.13 に DT 中性子照射に伴う漏れ電流変化の測定結果例を示す。この結果では、シースに正の電圧を印加しているために電子はシースへ向かって移動し、芯線では正の電流が観測されている。照射開始直後の緩やかな中性子フラックスの立ち上がりにも関わらず、漏れ電流には大きなピークが見られる。その後、電流はゆっくりと減少して定常状態に落ち着いている。また、照射停止時には、開始時に観測されたものと逆の向きへの過渡的なピークが現れ、照射前の電流値に戻る。負のバイアス電圧を印加した場合には、過渡電流のピークおよび定常電流の流れる向きは示した例と逆になる。

過渡電流ピークの高さとシースに印加するバイアス電圧の関係を図 2.14(a)に、中性子フ

ラックスとの関係を図 2.14(b)に示す。ピークの高さはバイアス電圧およびフラックスにほぼ比例していることから、過渡電流は中性子照射によって絶縁層内に生じた電荷のドリフトによって形成されていると考えられる。同様の過渡的な電流ピークは、平板状のセラミック(サファイア)試料に対する同様の中性子誘起伝導測定においても観測されている。中性子により電荷が生成され続けると、やがて捕獲作用に伴う電荷の蓄積や再放出、その結果生ずる分極効果やドリフト速度の変化などが生じると考えられる。それらの変化が平衡状態に落ち着くと電流値が減少し、定常電流が流れ続ける。

2.7.3 定常電流の電圧および中性子フラックス依存性

中性子照射下における定常電流を測定し、バイアス電圧との関係を調べた結果を図 2.15 に示す。2 種類のケーブル共にバイアス電圧と共に電流値が増加するものの、高い電圧で飽和傾向が見られた。また、バイアス電圧が 0Vの時にも中性子誘起電流が観測された。この際の電流の向きは直前の測定において印加していたバイアス電圧の極性に依存した。直前の測定において正のバイアス電圧を印加していた場合、バイアス 0Vの測定で負の中性子誘起電流が、逆に、直前に負の電圧を印加していた場合には正の誘起電流が観測された。バイアス電圧 0V 付近の場合、絶縁層内部の電界は直前の測定において蓄積した電荷の分布により支配されているためと考えられる。

図 2.16 に中性子照射下における定常電流と中性子フラックスの関係を示す。バイアス電圧は-70Vに固定し、フラックスのみを変化させている。ケーブルA、Bともにフラックスと電流値はほぼ比例関係を示した。また、それらの比例定数から、同じバイアス電圧、中性子フラックスに対して、太いケーブルBは細いケーブルAの～4.8倍の中性子誘起電流が観測されていることがわかる。観測されている電流値は生成電荷量とドリフト速度の積によって支配されると考えられる。ケーブルBにおける生成電荷量は体積比からケーブルAの～27 倍である。一方のドリフト速度に関しては、太いケーブルBの絶縁層内における電界強度が弱いために、ケーブルAと比べて遅くなると考えられる。図 2.17 に解析式から計算される同軸ケーブル絶縁層内の径方向における電界強度分布を示している。この計算では絶縁層内に存在する電荷や分極の影響を考慮していないが、ケーブルB内の電界強度はケーブルA内の 1/5 程度となり、電荷のドリフト速度も同程度の違いが生じたと推測される。したがって、ケーブルBの電流値はケーブルAの 27×1/5 (= 5.4)倍程度になると考えられ、実験値に近い値となる。

2.8 DD 中性子照射実験

2.8.1 DD 中性子誘起伝導測定実験

DT および DD 中性子照射効果の相関を調べるために、同じ MI ケーブルに対して DD 中性子誘起電流の測定を行った。DD 中性子はトリチウムを吸蔵させたチタンターゲットの代わりに、イオンビームにより重水素が打ち込まれたチタンターゲットを用いて発生させた。照射中の DD 中性子フラックスの変化はウラン核分裂検出器によりモニターした。検出器の計数から DD 中性子フラックスへの換算係数は Ni 箔を用いた箔放射化法による中性子フルエンス測定を行って求めた。照射に用いた MI ケーブル、実験体系および実験方法は DT 中性子照射実験と同じである。

2.8.2 DT-DD 中性子相関

DD 中性子誘起電流の測定に対しても、中性子フラックス変化に伴う過渡的なピークの出現や定常状態における電流-電圧特性、フラックス依存性について、DT 中性子に対する測定と同様の結果が得られた。図 2.18 に、ケーブルBに対して行った定常状態における DD 中性子誘起電流のフラックス依存性を DT 中性子照射により得られた結果とともに示している。同じ照射フラックスに対して中性子誘起伝導の効果の大きさに違いが認められ、この実験結果から求められた相関係数は～3であった。図 2.19、図 2.20 に示すように、絶縁層を形成するマグネシウム原子、酸素原子と中性子との核反応断面積に関して、DD 中性子のエネルギーはしきい値以下となっている。中性子核反応の有無により絶縁層内に生成される電荷量に違いが生じ、DT 中性子誘起電流は DD 中性子に対する値と比較して大きくなっていると考えられる。

2.9 まとめ

無機絶縁(MI)ケーブルの中性子照射誘起電気伝導について調べるために、日本原子力研究所 FNS 施設において DT および DD 照射実験を実施した。中性子照射に伴う芯線-シース間の漏れ電流の変化を中性子誘起伝導の効果として測定した結果、以下のことが観測された。

中性子照射開始直後に過渡的な電流のピークが現れ、その後ゆっくりと減少して定常電流に落ち着いた。この過渡電流のピークの高さは芯線-シース間電圧や中性子フラックスにほぼ比例しており、中性子照射に伴い絶縁層内に生成された電荷のドリフトに起因していることを示している。また、照射停止直後にも、過渡電流のピークが現れた。

中性子照射中に観測される定常電流の大きさも芯線-シース間電圧や中性子フラックスと共に増加する。定常電流とバイアス電圧の関係は完全な比例関係ではなく、高い電圧に対して電流の増加が抑えられる傾向が見られた。

また、バイアス電圧が 0Vにおいても中性子誘起電流は観測された。この際に観測される電流の向きは直前の測定におけるバイアス電圧の極性によって異なった。このことから絶縁層内には蓄積電荷による分極が生じており、その電界が電流の向きを支配していると考えられる。

過渡的なピークの出現やバイアス電圧 0Vの際に流れる電流の向きに関しては、今後、電荷蓄積効果や生成電荷の挙動を考慮したポアソン方程式にもとづく電界計算を行い、詳細な機構解明を行う必要がある。

中性子誘起伝導の DD-DT 中性子相関を調べるために、同じケーブルに対して DD 照射実験を行った。DT および DD 中性子誘起電流の大きさを比較した結果、DT 中性子照射の効果が大きく、その相関係数は～3であった。この違いは荷電粒子生成核反応の有無によって生じていると考えられる。

表 2.1 代表的なセラミックスの材質名と種類

材質	具体例
ハロゲン化合物	LiF, NaF, KF, ・・・
炭酸塩	$CaCO_3$, $MgCO_3$, ・・・
酸化物	MgO; Al_2O_3, SiO_2, ZrO_2, $MgAl_2O_4$, Fe_3O_4, $MgSiO_3$, ・・・
窒化物	BN, AlN, Si_3N_4, TiN, ・・・
炭化物	B_4C, Al_4C_3, SiC, TiC, ・・・
元素	C, Si, Ge, ・・・

表 2.2 サファイア(Al_2O_3)の物理的特性

結晶系	六方晶系
化学組成	Al_2O_3
比重	3.9 (g/cm^3)
原子密度	Al : 4.6×10^{22} (n/cm^3) O : 6.9×10^{22} (n/cm^3)
導電率	$<10^{-16}$ (S/m)
比誘電率	9.5 (1 MHz)

表 2.3 各種セラミックスのバンドギャップ

材料	Eg (eV)	材料	Eg (eV)
Al_2O_3	7.3～10	NaCl	7.3
SiO_2	8	KCl	7～9.5
MgO	7.8～8	CaF_2	10
UO_2	5.2	α-SiC	2.7～3
NiO	4.2	BN	4.8
CoO	4	ダイヤモンド	5.7
Fe_2O_3	3.1	Si	1.1
TiO_2	3.0～3.8	Ge	0.7

表 2.4 FNS 加速器概要

形式	400 keV 重陽子加速器
直流高圧電源	450 kV、80 mA
イオン源	大電流用 740 型デュオプラズマトロン 小電流用 820 型デュオプラズマトロン アークパルス
ビーム電流および 中性子発生量	0 度 ビームライン ： 25 mA、4×10^{12} n/s 80 度 ビームライン ： 3 mA、3×10^{11} n/s
パルス性能	パルス幅最小 2 ns (FWHM) ピーク電流 80 mA
ターゲット	0 度ビームライン 回転ターゲット (230mm ϕ) 回転数 880 rpm 真空シール方式 スライディングシール 80 度ビームライン 水冷および空冷固定ターゲット
ターゲット トリチウム装荷量	0 度ビームライン ： ～37 TBq (1000 Ci) 80 度ビームライン ： ～0.37 TBq (10 Ci)
主な付属設備	(1) トリチウム吸着処理設備 (TAP) (2) トリチウムターゲット取り扱い設備 (グローブボックス、フード) (3) ターゲット表面温度測定装置

表 2.5 14 MeV 中性子照射実験の中性子および γ 線フラックスの計算結果
(D-T neutron : 3×10^{12} n/s)

Distance from Target (mm)	Neutron (n/cm^2/sec)	Gamma-ray (γ/cm^2/sec)
15	7.5×10^{10}	9.0×10^{9}
30	2.3×10^{10}	2.8×10^{9}
45	1.1×10^{10}	1.3×10^{9}

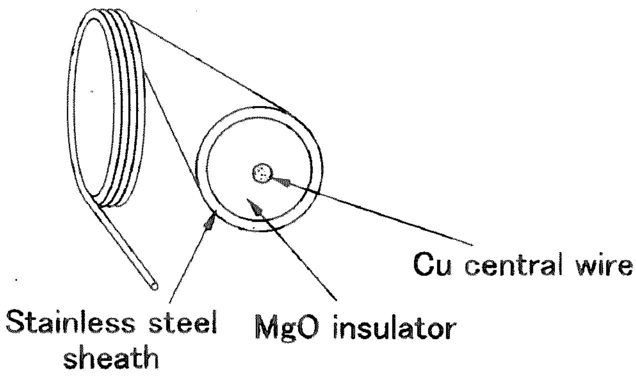


図 2.1 MI ケーブルの構造

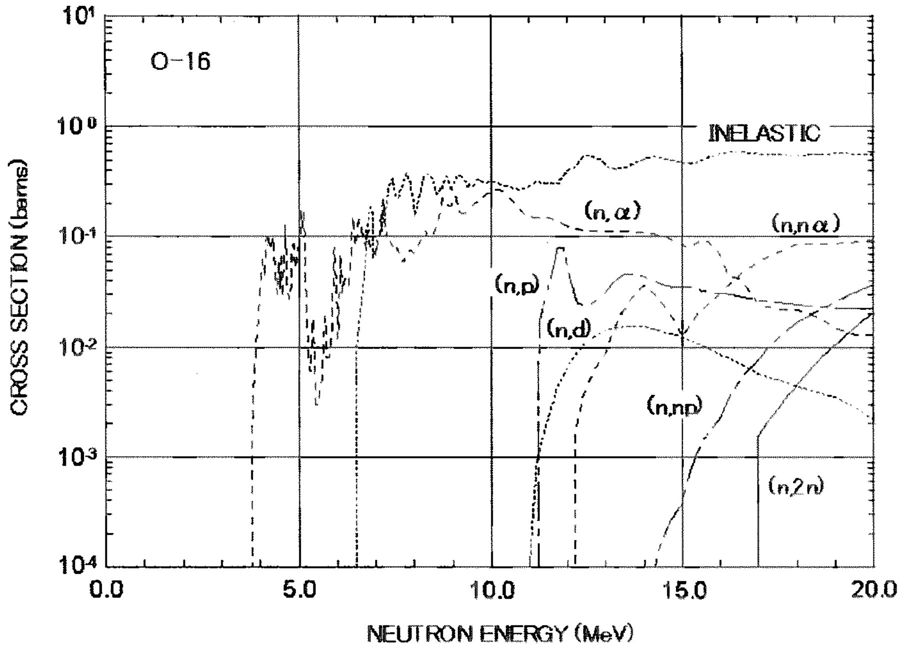


図 2.2 酸素原子の中性子反応断面積（JENDL-3.2）

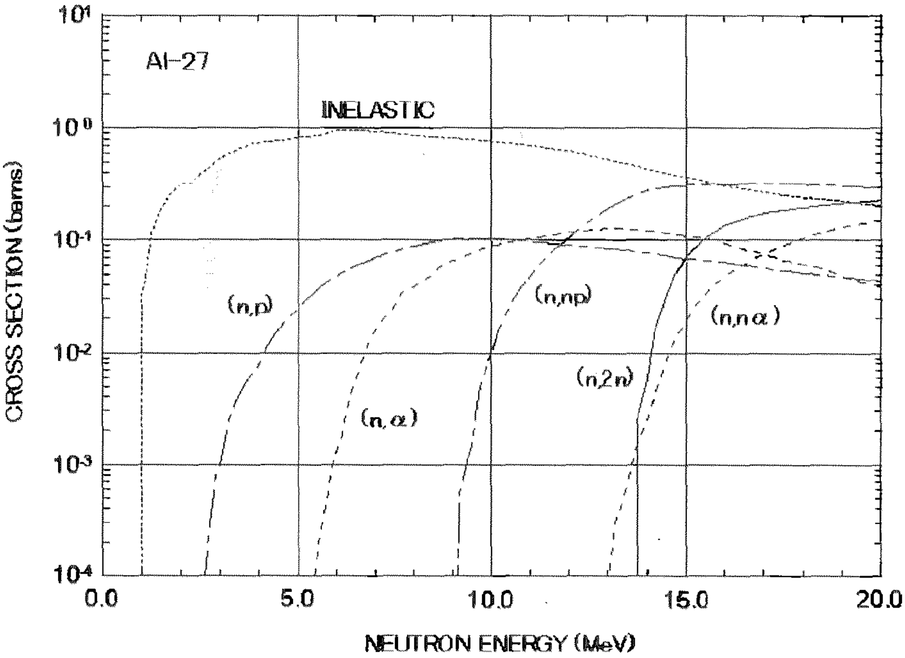


図 2.3 アルミニウム原子の中性子反応断面積（JENDL-3.2）

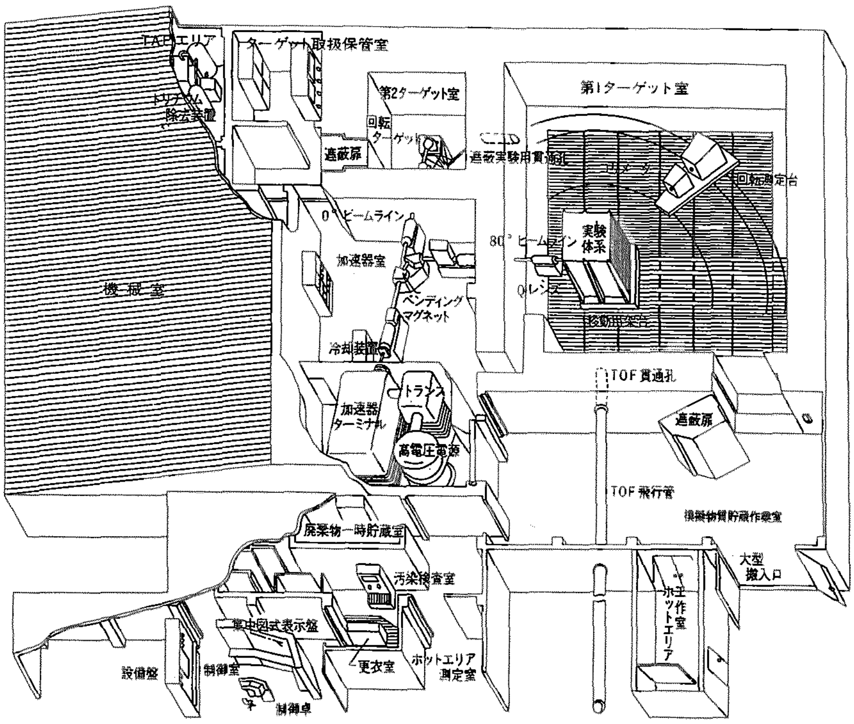


図 2.4 FNS 鳥瞰図

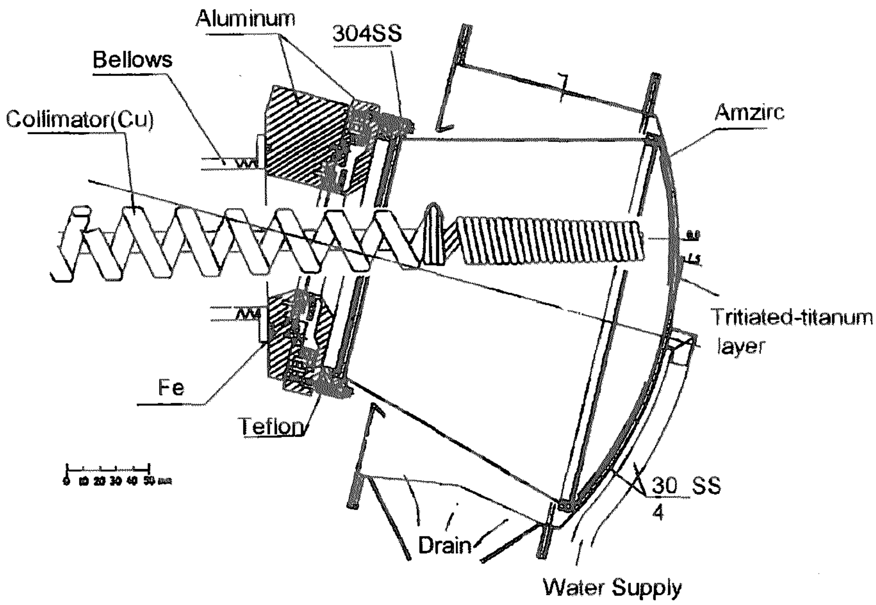
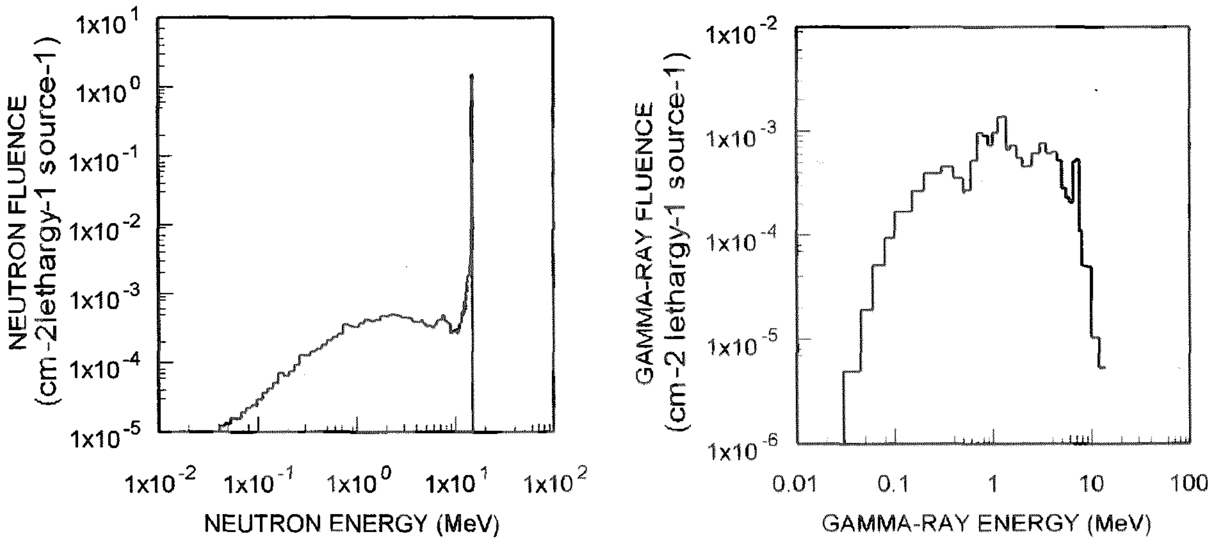


図 2.5 FNS 回転トリチウムターゲットアセンブリ



(a) 中性子エネルギースペクトル　　(b) γ線エネルギースペクトル

図 2.6 回転トリチウムターゲット近傍の中性子およびγ線のエネルギースペクトル
(ターゲット中心位置より前方 15mm の位置)

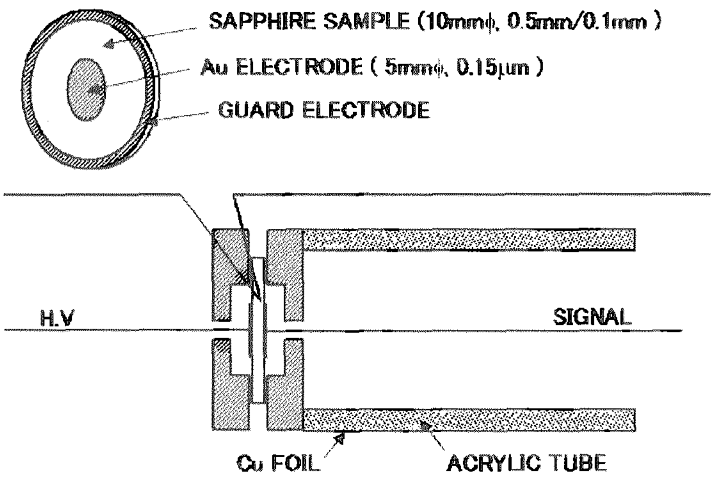


図 2.7 14 MeV 中性子照射下における電気的特性測定実験用高純度サファイア試料

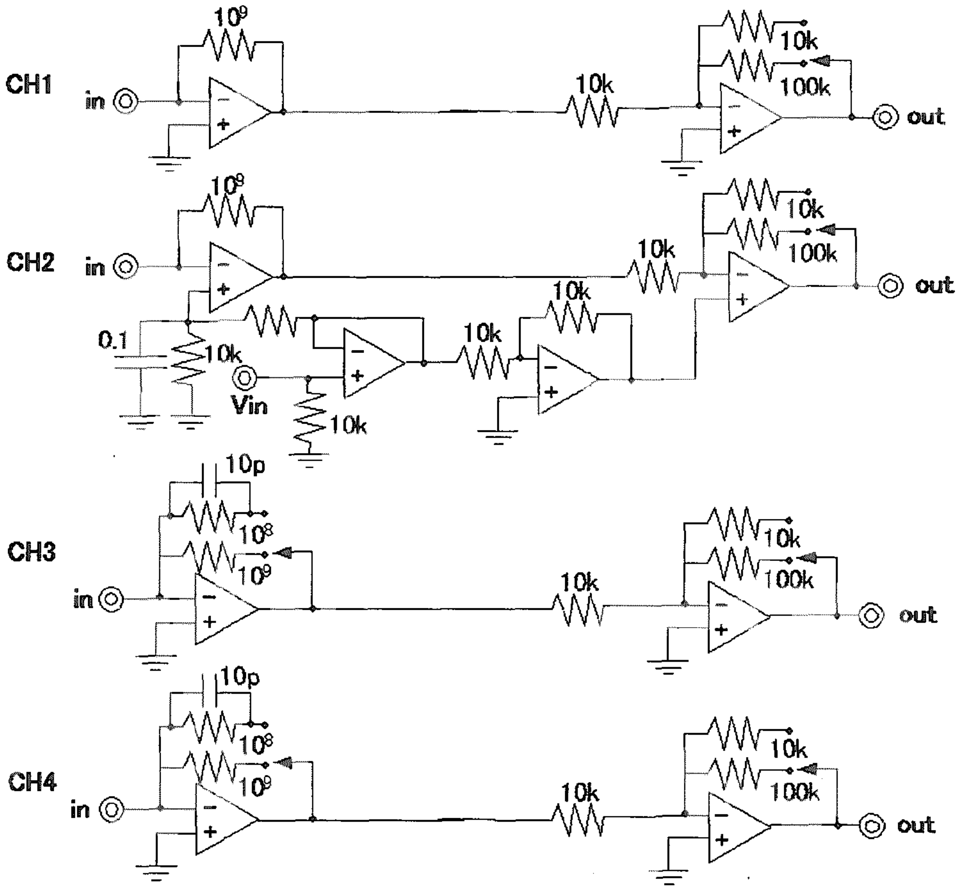


図 2.8 中性子誘起電流測定用4チャンネル微小電流計

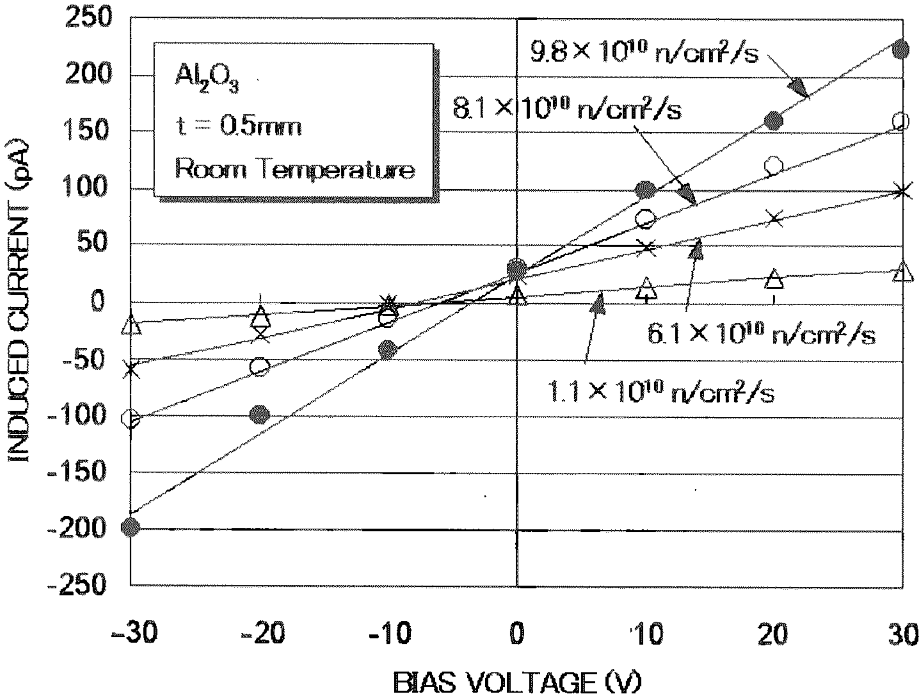


図 2.9 高純度サファイアの 14MeV 中性子照射下での電流-電圧特性

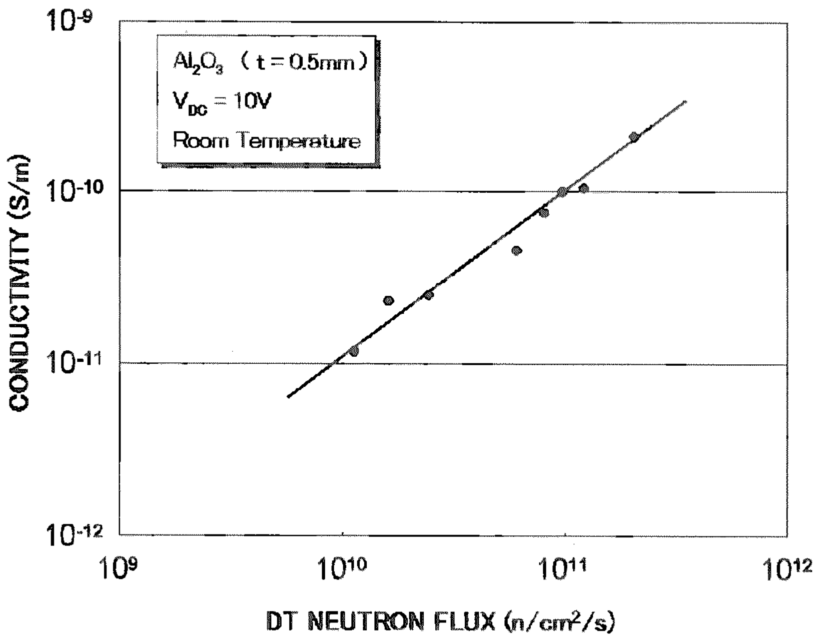


図 2.10 高純度差ダイアの 14MeV 中性子誘起伝導度とフラックスの関係

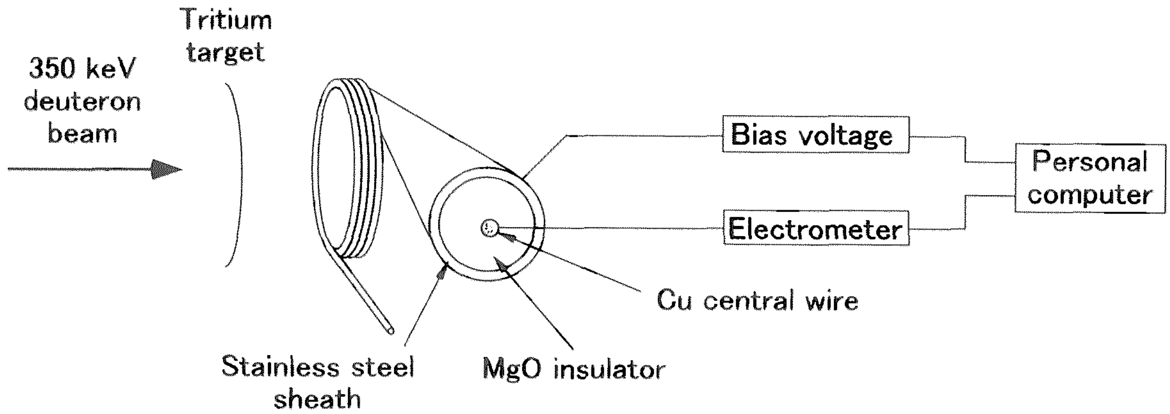


図 2.11 MI ケーブルに対する中性子照射実験の概略図

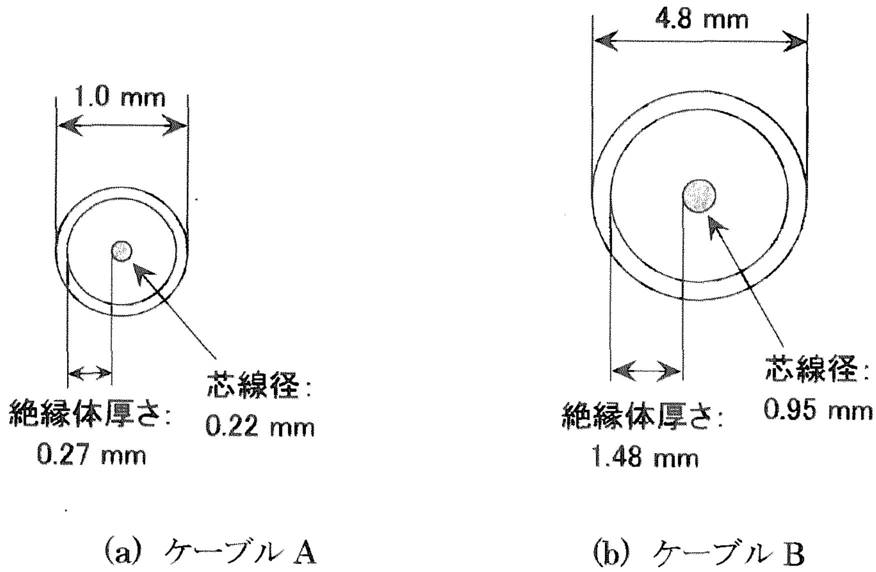
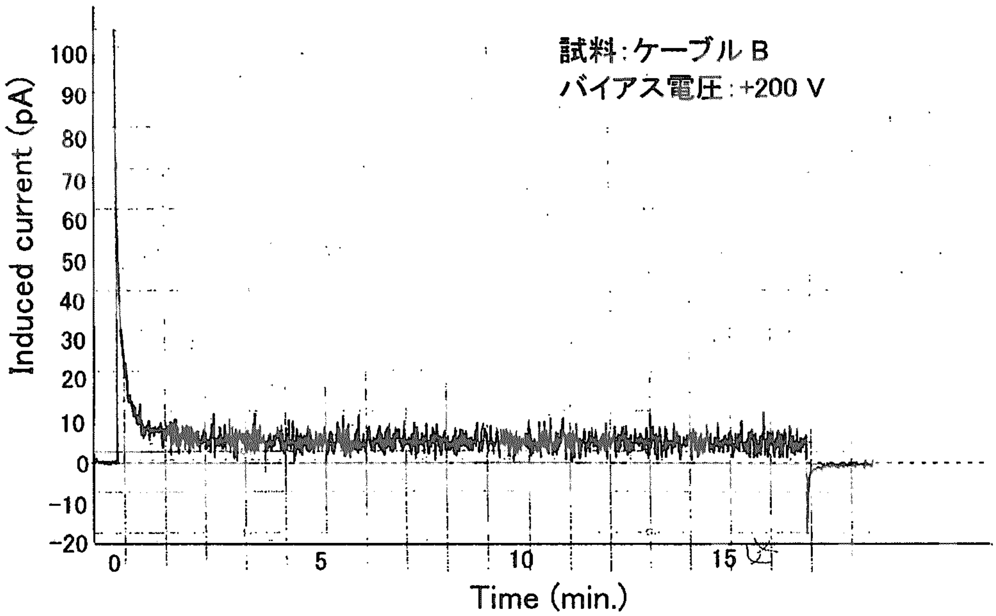
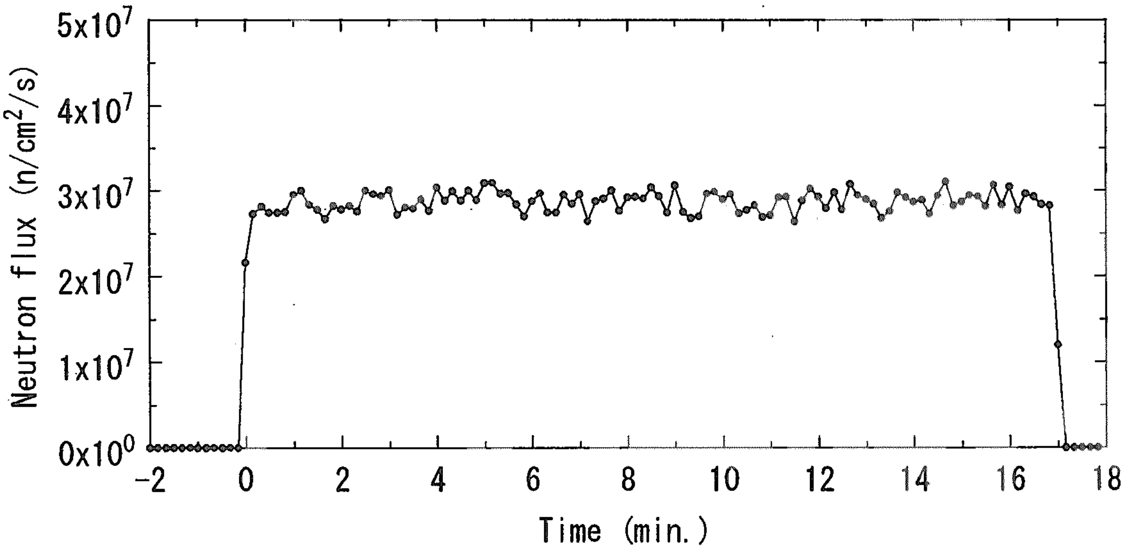


図 2.12 照射実験に用いた MI ケーブルの寸法

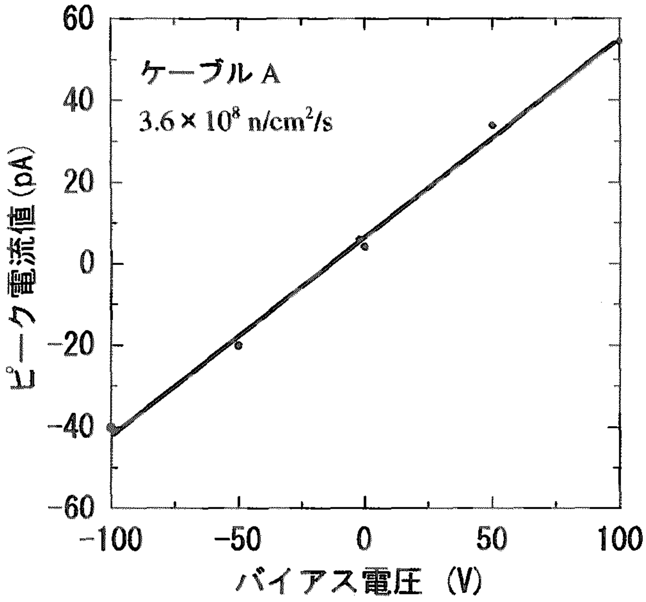


(a) DT 中性子誘起電流の変化

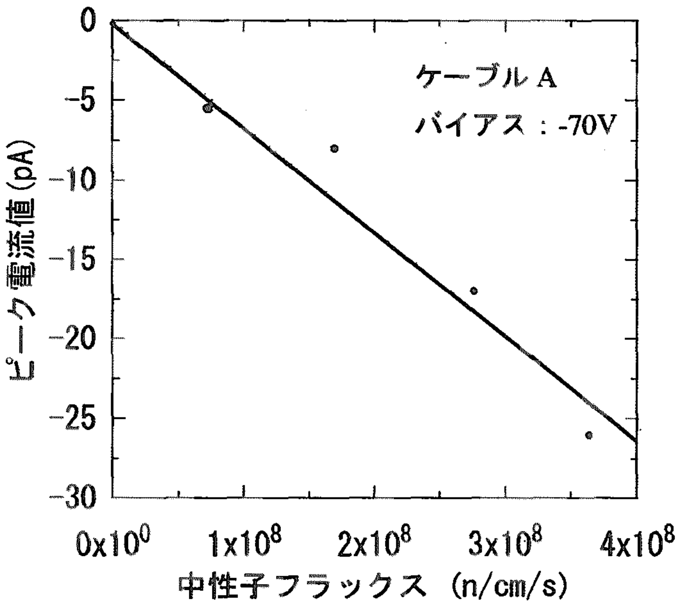


(b) 試料位置における中性子フラックスの変化

図 2.13 DT 中性子誘起電流の測定結果例

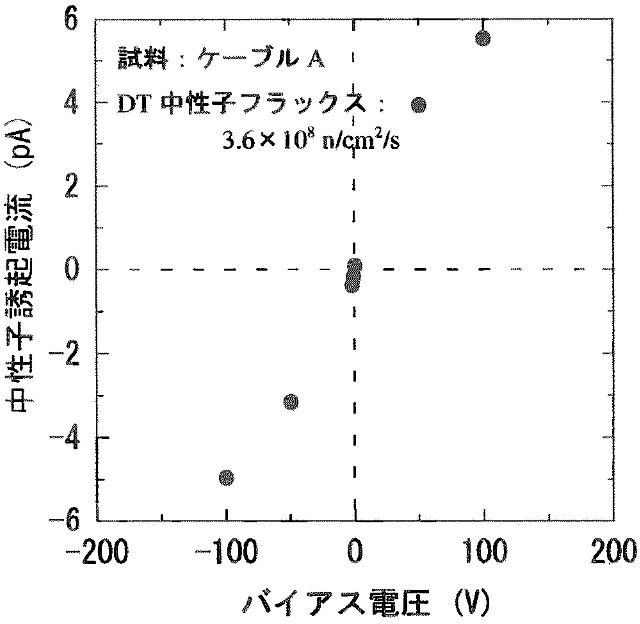


(a) バイアス電圧との関係

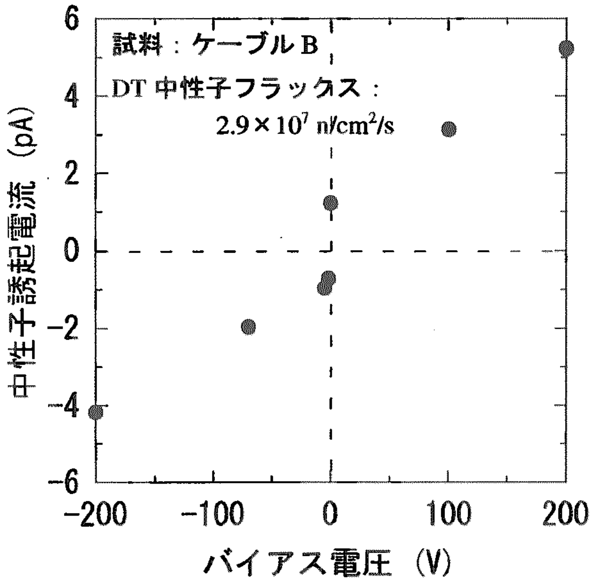


(b) 中性子フラックスとの関係

図 2.14 過渡電流ピークの大きさとバイアス電圧および中性子フラックスとの関係



(a) ケーブル A



(b) ケーブル B

図 2.15 中性子誘起電流の大きさとバイアス電圧との関係

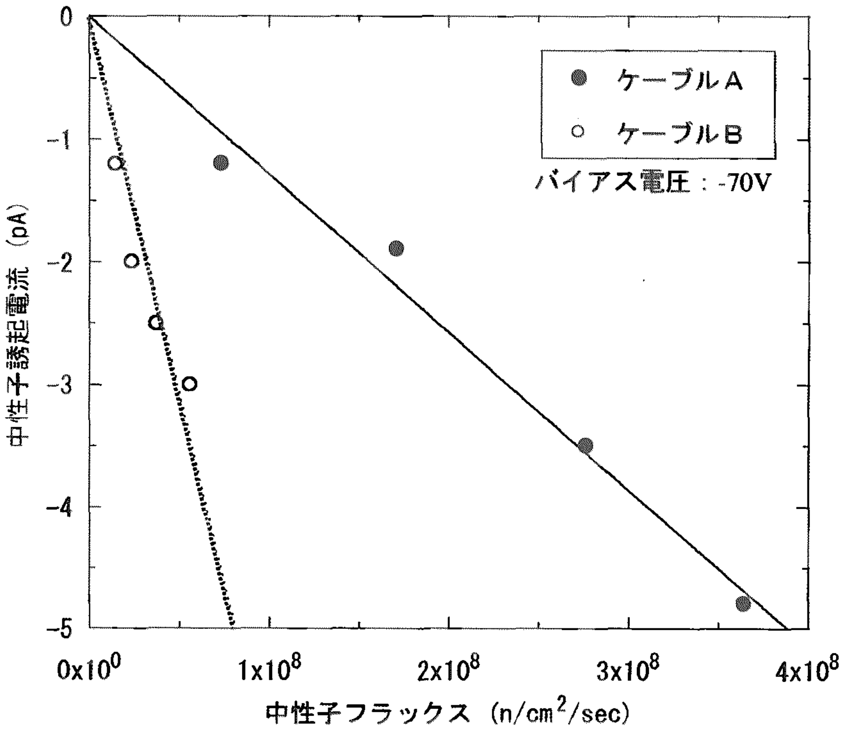


図 2.16　中性子誘起電流と中性子フラックスとの関係

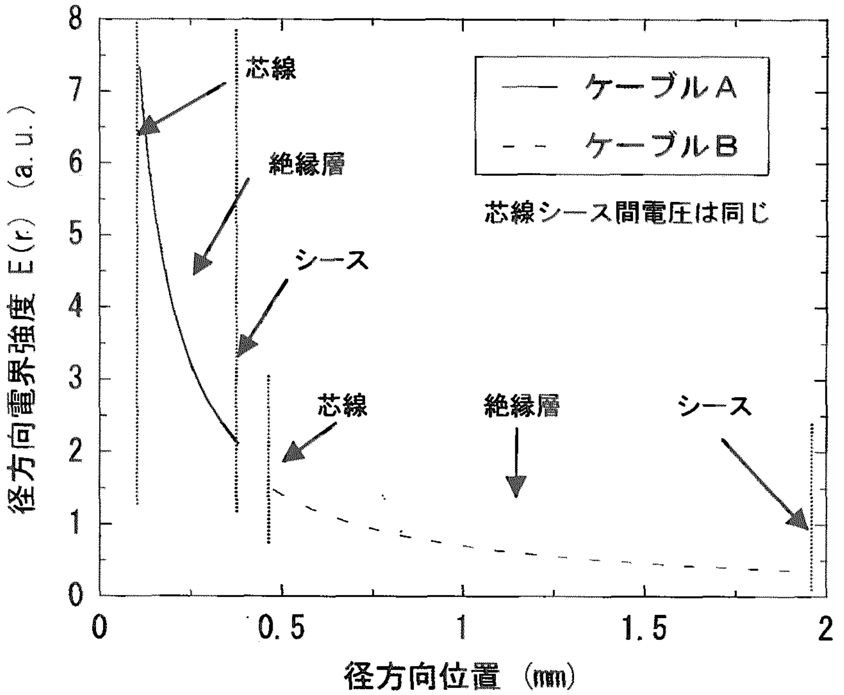


図 2.17　解析式から計算される同軸ケーブル絶縁層内の径方向電界強度分布

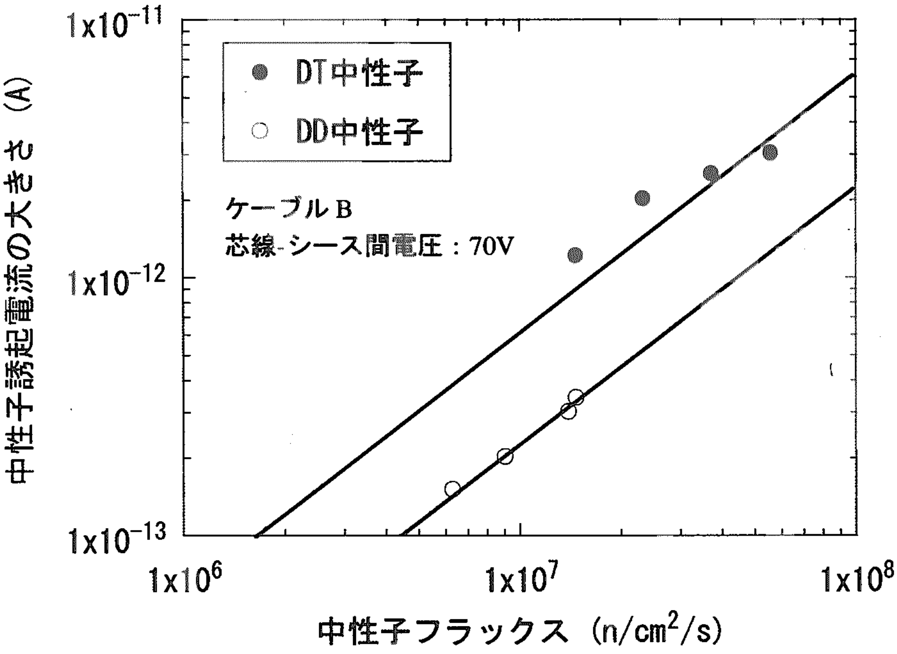


図 2.18　DT および DD 中性子照射による誘起電流の比較

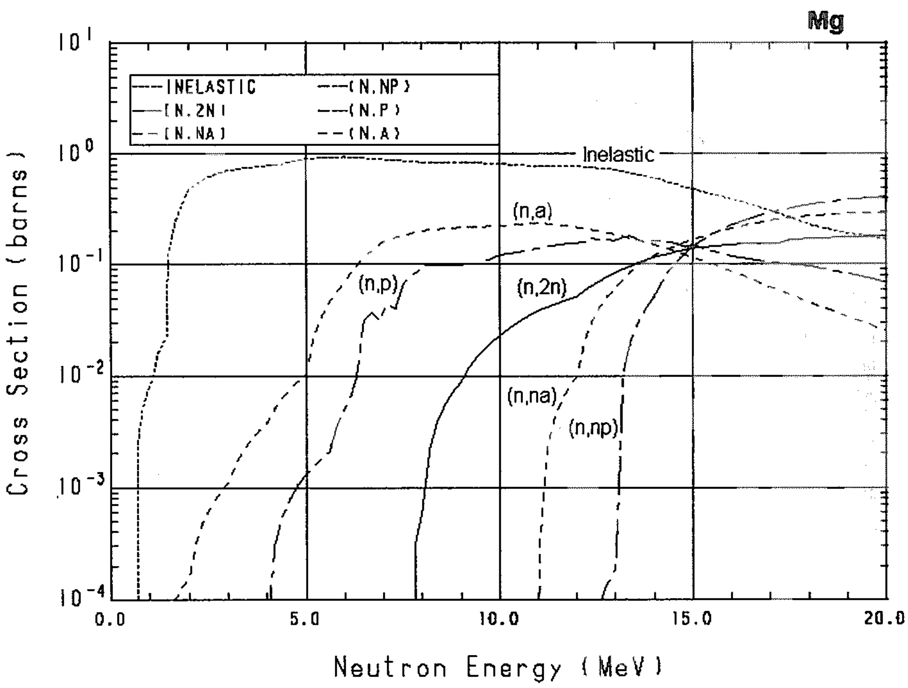


図 2.19　マグネシウム原子の核反応断面積

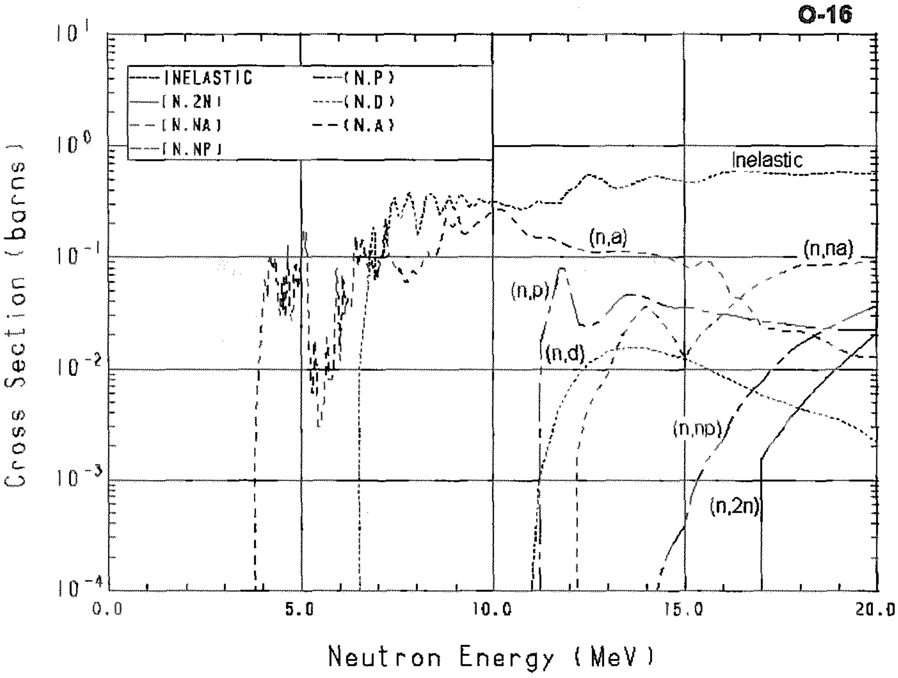


図 2.20 酸素原子の核反応断面積

3. ^{60}Co－γ線 およびパルスX線照射実験

3.1 はじめに

電気絶縁材料の放射線誘起電気伝導現象は、放射線の電離作用に起因するものであり、高エネルギー中性子環境に限らず 2 次γ線等の誘導放射線場においても生じる。

第 2 章では、DT と DD の核融合反応を電気的に制御できる FNS 中性子源を利用した、14MeV と 2MeV のほとんど単色中性子照射場での照射実験について述べた。しかし、実際の D-T 核融合炉では、14MeV 及び2MeV の中性子の発生に伴い、周囲の大型構造材との核反応により相当量の 2 次γ線が同時に放射される。従って、核融合炉環境における絶縁材料の放射線誘起電気伝導の問題は、中性子のみならずγ線の影響も重要である。電気絶縁材料のγ線のみによる照射誘起電気伝導に関するデータの収集と、その機構に関する考察が重要である。

この章では、セラミックス絶縁材料やMIケーブルの核融合中性子照射実験において観測された現象について、別の角度からさらに調べている。具体的には ^{60}Co－γ線とパルス X 線による同様試料の照射実験を実施し[12, 13]、その内容について述べている。

核融合中性子照射の場合は、セラミックス絶縁材中の構成原子との核反応により発生した荷電粒子が絶縁材中を走り、その飛跡の近傍で生じた電荷が誘起電流に寄与するのに対して、γ線照射の場合では絶縁材中に入射したγ線が内部で高速電子を生成する。エネルギー付与過程の違いによる効果についても、放射線誘起電気伝導の機構を調べる上で興味深いところである。

パルス X 線照射は、高エネルギーパルス電子線をアルミニウム製ダンパーに衝撃させ、発生する制動 X 線を利用している。電気絶縁材料の放射線誘起電気伝導において、試料中に生成した電子（及び正孔）の挙動を考察するには、パルス状放射線照射に対する照射試料の誘導電流波形を観測することが非常に有効である。

この章では ^{60}Co－γ線及びパルス X 線の照射実験の詳細とその実験結果について考察を行っている。

3.2 ^{60}Co－γ線照射実験

3.2.1 γ線誘起伝導測定実験

図3.1にMIケーブルの^{60}Co－γ線照射実験の概略図と測定系のブロック図を示している。^{60}Co－γ線照射には、大阪大学産業科学研究所のコバルト棟を利用した。照射用MIケーブルは、第2章で述べた中性子照射実験に用いたものと同様、市販の同軸型のもので（助川電気製）、長さ200cm、SUS製シース（外径4.8mm）、銅製中心線（線径0.95mm）、絶縁材は粉末MgOである。MIケーブルサンプルは、図3.1に示すように外径約17cmのリング状に束ね、中心に60Co線源をセットし、電気絶縁性低下特性（漏れ電流）について測定した。試料（酸化マグネシウム）の吸収線量率は、電離箱の測定値と幾何学配置を考慮した計算から、約4Gy/secと推定された。

また、同じMIケーブルサンプルの温度を20℃から100℃まで変化させ、温度変化に伴う電気絶縁性低下特性を測定した。

3.2.2 結果および考察

図3.2は、^{60}Co線源をMIケーブルサンプルの中心から取り除いた時のMIケーブルの中心線に流れる漏れ電流の変化の例を示している。MIケーブルサンプルから^{60}Coを取り除くと同時に電流は瞬時に低下し、約2秒後には一定となっている。この変化からMIケーブルの放射線誘起電流の大きさを求めることができる。

図3.3は、^{60}Co－γ線照射時MIケーブルのバイアス電圧を変化させた時の漏れ電流の測定結果である。漏れ電流はバイアス電圧にほぼ比例している。次の3.3節に述べているパルスX線照射実験結果との定量的な比較考察はまだ十分なされていないが、定性的には同様の結果が得られている。また、MIケーブル試料の温度を約100℃まで変化させて同様の測定を行ったが、この温度範囲内では顕著な温度効果は見られなかった。

3.3 パルスX線照射実験

3.3.1 パルスX線照射による過渡応答測定実験

図 3.4 に MI ケーブルのパルス X 線照射実験の概略図と測定系のブロック図を示している。実験には、大阪大学産業科学研究所の 27MeV 電子ライナックを利用した [14]。パルス幅約 8ns のパルス電子ビームをアルミニウム製ダンパーに衝突させ、この際に発生する制動 X 線を利用している。1 パルスあたりの照射線量は電離箱で測定した。MI ケーブルサンプルは 3.2 節において述べた ^{60}Co-γ 線照射実験に用いたものと同じであり、図 3.4 に示すように外径約 17cm のリング状に束ね、アルミニウム製ダンパーの後方に設置した。試料(MgO)の吸収線量は、電離箱の測定値と計算から、低線量率照射のケースで約 7×10^{-6} Gy/パルス、高線量率照射のケースで約 6×10^{-5} Gy/パルスと推定された。

測定系では、MI ケーブルのシースは接地し、中心線(信号線)に、バイアス電圧(－300V ～＋300V)を印加した。そして、パルス X 線照射に伴って中心線に誘導される電荷量を通常の電荷増幅器システムで測定した。なお、パルス電子ビームによる外側シース等への誘導ノイズは十分に小さいことを確認している。電荷増幅器からの出力信号波形を、パルス電子ビーム発生装置からのトリガ信号を利用(加算平均法)して、デジタルオシロスコープで測定記録した。

3.3.2 結果および考察

図 3.5 に、パルス X 線照射に対する MI ケーブルの応答、具体的には電荷増幅器の出力波形の例を示している。信号パルス波形の立ち上がり時間は約 100ns、減衰時間は 100 μs である。このように、パルス X 線照射に伴って MI ケーブルの中心線に誘導される電荷が電荷増幅器系で正確に積分されていることがわかる。ピーク波高値は、パルスあたりの電子ビーム強度(パルス X 線線量)とバイアス電圧に明瞭に依存し、印加電圧の極性による大きな違いは見られなかった。

図 3.6 は、パルス X 線照射における MI ケーブル試料のバイアス電圧と誘導電荷量の関係についてまとめたものである。同じ吸収線量率では、パルス照射当たりの誘導電荷量はバイアス電圧にほぼ比例していた。また、同じバイアス電圧では、パルス照射当たりの誘導電荷量は吸収線量率にほぼ比例していた。このことは、パルス放射線照射下においても、絶縁材料の電気絶縁性低下が照射による材料中の電荷生成量とそれらのドリフトによって支配されることを窺がわせている。

MI ケーブルのパルス X 線照射応答機構について調べるために、MI ケーブルの絶縁体

(MgO)中で生成される電子のドリフトに基づく中心線上の誘導電荷生成のシミュレーション計算を試みた。具体的には、印加電圧が一定である条件下で、絶縁体中に放射線照射により電荷が正負に分かれて生成された場合に、中心線とシース間でどれだけの電荷の移動が起こるかをポアソン方程式に基づき数値計算した。数値計算では、電極内部に仮想電荷を置き、その作用を重畳する電荷重畳法を用いた。MI ケーブルの中心線の内側とシースの外側に、それぞれ正と負の仮想電荷を 300 個置き、電極表面に同数の輪郭点を置いた。各輪郭点での電位 V_i は、次式で表される。

$$V_i = \sum_{j=1}^{n} P(i,j) \times Q(j)$$

P は各仮想電荷と輪郭点の電位係数、Q は仮想電荷である。Vi が中心線もしくはシース電圧に等しくなるように連立方程式を解き、各 Q(j)を求めた。MgO の誘電率は 10 とした。この計算コードの精度は、本計算コードで求められる同軸ケーブルの静電容量が理論値と良く一致することで確かめている。

表 3.1 に、実験結果とそれを元に行った若干の考察の結果をまとめている。照射パルス当たりの酸化マグネシウム中の生成電子正孔対数は、絶縁体中における一対の電子正孔の生成に必要な平均エネルギーをバンドギャップの 3 倍(約 22 eV)と仮定して求めている。これらの生成電荷が全てそれぞれの電極に集められる場合に比べて、誘導電荷の実際の測定値は 5 桁小さく、正孔はほとんど動かず、電子も僅かしかドリフトしないことがわかる。誘導電荷についてのシミュレーション計算では、MI ケーブル内に均一に電子正孔対ができているとし、計算で概算した生成電子正孔対数と、実測の誘導電荷量の値から電子の平均ドリフト距離を推定した。バイアス電圧は 100V、中心線及びシースの電位がそれぞれ 100V、0V である。このケースの平均電子ドリフト距離は、低線量率、高線量率ともに非常に小さく、約 15nm と推定された。なお、この値の物理的妥当性についての検証には、別な手法による詳細な実験測定が必要と思われる。

3.4 まとめ

14MeV 中性子誘起伝導の関連実験として、MI ケーブルの ^{60}Co-γ 線照射実験およびパルスX線照射実験をそれぞれ大阪大学産業科学研究所 ^{60}Co-γ 線照射施設、L-バンド電子ライナックを利用して行った。

^{60}Co-γ 線照射により誘起される漏れ電流はバイアス電圧にほぼ比例した。また、100℃までの温度範囲内では温度効果は特に認められなかった。第 2 章に述べた中性子照射実験の結果に見られる照射フラックス変化時の過渡的な電流ピークは ^{60}Co-γ 線に対して観測されておらず、今後、違いについて考察を行う必要がある。

電子ライナックを利用したパルス X 線照射実験では、中心線に誘導される電荷量は、パルス当たりの吸収線量と中心線-外側シース間のバイアス電圧にほぼ比例した。このことは、パルス放射線照射下においても、絶縁材料の電気絶縁性低下が照射による絶縁体中の電荷生成量とそれらのドリフトによって支配されることを窺がわせている。また、X 線パルス 1 照射当たりに MgO 中に生成される電子正孔対数を、電離箱測定によるパルス当たりの吸収線量から概算した。そして、その結果と MI ケーブルの中心線に誘導されるパルス電荷量についてのシミュレーション計算結果から、MgO 中の生成電子の平均ドリフト距離は約 15nm(バイアス電圧:100V)と推定された。この値の物理的妥当性の検証については別の観点や原理に基づく実験測定が必要と思われる。

表 3.1 実験結果を元にシミュレーション計算により行った考察の要約

Irradiation condition	Low dose rate	High dose rate
Absorption dose[Gy/pluse]	$\sim 7\times10^{-6}$	$\sim 6\times10^{-5}$
Induced charge (Experiment)[C/pulse]	1.0×10^{-13}	9.1×10^{-13}
Number of generated electron-hole pairs [/pulse]	1.6×10^{11}	1.4×10^{12}
Induced charge (calculation)[C/pulse]	1.3×10^{-8}	1.1×10^{-7}
Averaged electron drift distance[nm]	15	15

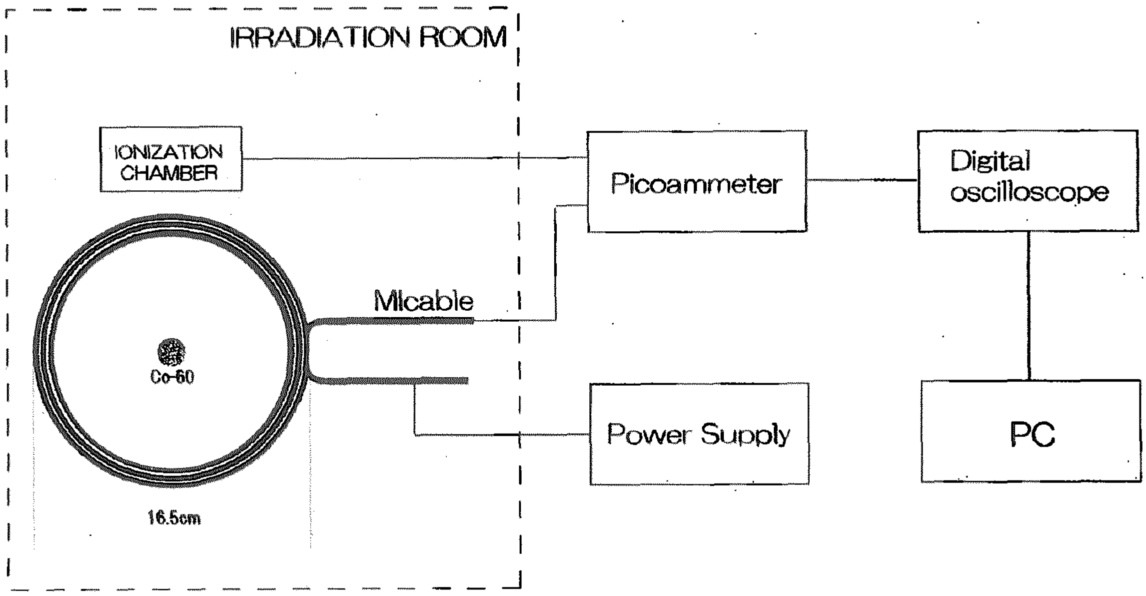


図 3.1 ^{60}Co−γ線照射実験の概略図および測定系のブロック図

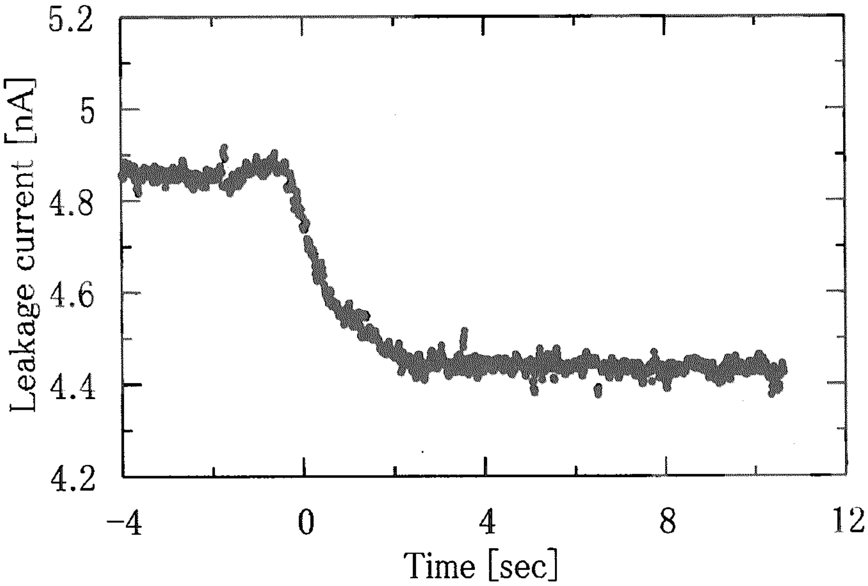


図 3.2 ^{60}Co-γ 線源を除去した際の漏れ電流変化の例

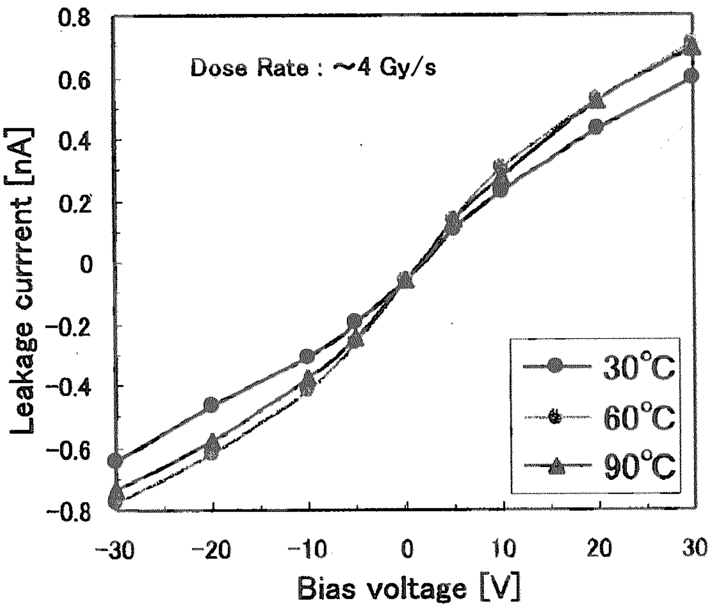


図 3.3 ^{60}Co-γ 線照射時の漏れ電流とバイアス電圧の関係および温度依存性

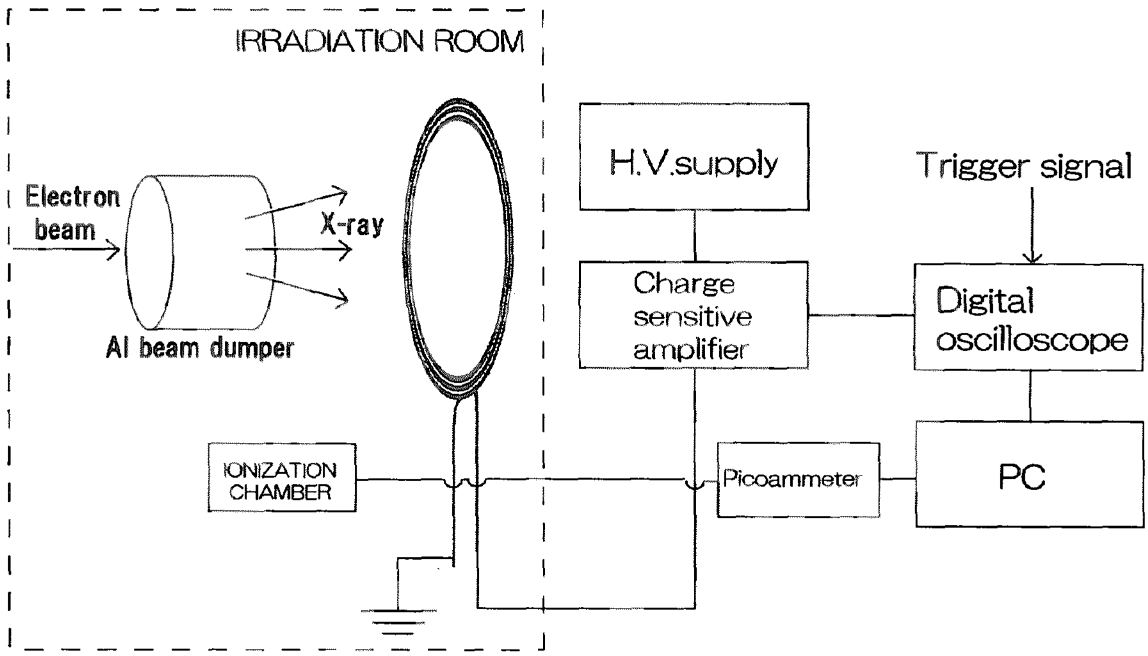


図 3.4 パルスX線照射実験の外力図および測定系のブロック図

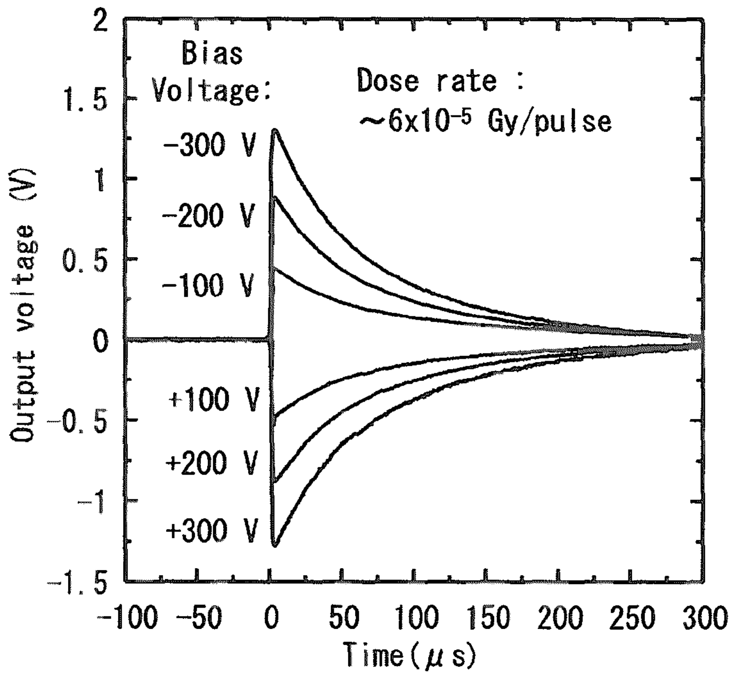


図 3.5 電荷増幅器の出力波形例

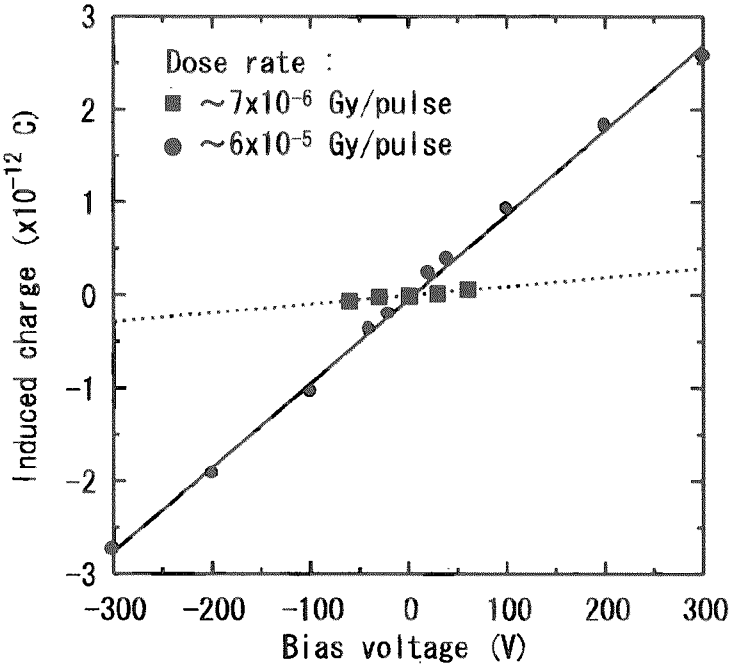


図 3.6 パルス X 線により誘起される電荷量とバイアス電圧との関係

4. 結言

核融合炉用無機絶縁(MI)ケーブルの動的照射効果である中性子誘起電気伝導について調べるために、日本原子力研究所 FNS 施設において DT および DD 中性子照射実験を行った。また、線質の異なるγ線の照射効果や、放射線誘起電気伝導の機構を調べるための関連実験として、^{60}Co-γ線照射実験およびパルスX線照射実験を大阪大学産業科学研究所において行った。本研究における結論は以下のとおりである。

第2章では、日本原子力研究所FNS施設において行った MI ケーブルに対する核融合中性子誘起電気伝導測定の結果について述べた。測定ではケーブルの芯線-シース間に流れる漏れ電流の変化を核融合中性子誘起電流として測定した。中性子照射開始時には大きな過渡電流のピークが現れ、その後、ゆっくりと減少して定常電流に落ち着くことが確認された。また、照射停止時にも、開始時とは逆方向に過渡的な電流のピークが確認された。中性子フラックス変化時に現れる過渡的な電流ピークの大きさおよび定常状態における漏れ電流値は、芯線-シース間電圧や照射フラックスにほぼ比例した。このことから、過渡電流、定常電流ともに中性子がケーブル絶縁層内において生成する電荷のドリフトに起因した電流であることが確認された。芯線-シース間電圧が 0V の際にも、中性子誘起電流は観測された。その際の電流の流れる向きは測定の履歴によって異なった。このことは絶縁層内に蓄積電荷による分極現象が生じており、その電荷の分布状態によって誘起電流の方向が決定されることを示唆している。過渡的なピークが現れる機構や蓄積電荷に起因した分極効果の詳細な議論のためには、今後、材質中における中性子核反応の計算および生成荷電粒子の挙動と電界計算を組み合わせたシミュレーション計算を行う必要がある。

第3章では関連実験として行った、大阪大学産業科学研究所 ^{60}Co-γ線照射施設におけるγ線照射実験および同研究所 L-バンド電子ライナックを用いたパルスX線照射実験の結果について述べた。^{60}Co-γ線照射により誘起される電流はバイアス電圧にほぼ比例した。また、100℃までの温度範囲内では温度効果は認められなかった。中性子照射で見られた応答測定結果と若干の違いがあり、この違いに関してさらに調べる必要がある。パルスX線照射実験では、中心に誘起される電荷量はパルスあたりの吸収線量と芯線-シース間電圧にほぼ比例した。パルス放射線照射下においても、絶縁性低下が照射に伴う絶縁体中の電荷生成量とそれらのドリフトによって支配されていると考えられる。また、MgO 絶縁層内に生成される電子正孔対の数を電離測定によるパルス当たりの吸収線量から概算した。その結果と MI ケーブルの芯線に誘導されるパルス電荷量についてのシミュレーション結果から、MgO 中の生成電子の平均ドリフト距離は、芯線-シース間電圧 100Vの場合で、約 15nm と推測された。この値の物理的妥当性の検証については別の観点や原理に基づく実験測定が必要と思われる。

放射線誘起電気伝導の機構を詳細に考察するためには、電荷のドリフト速度や捕獲・再放出・再結合断面積等の各材質に特有な電気的パラメーターを取得する必要がある。今後、

本報告書に述べた照射実験と合わせて、我々の研究室が開発している精密イオンビーム照射装置を用いた集束パルスイオンビーム照射実験を行い、厳密な電気的パラメーターの取得を行うことが有効であると考えている。

謝辞

本調査研究は多くの方々の御協力により達成されたものである。特に、14MeV 中性子照射実験の実施にあたり、日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部核融合中性子工学研究室の FNS 施設運転スタッフの各氏には多大な御協力を頂いた。心よりお礼を申し上げる次第である。

^{60}Co-γ線照射実験では大阪大学産業科学研究所放射線実験所の 池田 稔治 助手、パルスX線照射実験では同実験所の 奥田 修一 講師 に御協力を頂いた。心より感謝する次第である。

また、実験データの解析と考察においては大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻の博士前期課程の 米澤 久恵 氏 に多大な御協力を頂いた。ここに深く感謝する次第である。

なお本報告書は日本原子力研究所の平成 13 年度委託研究「核融合炉用無機絶縁ケーブルの中性子照射効果に関する研究」の成果を中心に、平成 13 年度課題募集型協力研究「セラミックス電気絶縁材料の 1 4 MeV 中性子照射効果」の成果も加えてまとめたものである。

参考文献

[1] E. R. Hodgson; "General radiation problems for insulating materials in future fusion devices", Journal of Nuclear Materials, 258-263 (1998) 226-233.

[2] K. Noda, T. Nakayama, Y. Oyama, H. Maekawa, J. Kaneda and C. Kinoshita; "First in situ measurement of electrical resistivity of ceramic insilator during irradiation with neutrons of energy 14MeV", Fusion Engineering and Design, 29 (1995) 448-454.

[3] T. Shikama, M. Narui, H. Kayano and T. Sagawa; "Study of radiation induced electrical degradation of alumina in a dynamic pumping condition in a fission reactor", Journal of Nuclear Materials, 212-215 (1994) 1133-1137.

[4] J. D. Hunn, R. E. Stoller and S. J. Zinkle; "In-situ measurement of radiation-induced conductivity of thin film ceramics", Journal of Nuclear Materials, 219 (1995) 169-175.

[5] T. Shikama, M. Narui, A. Ochiai, H. Kayano and Y. Endo; "In reactor measurement of electrical conductivity of single crystal α-alumina", Science Report of the Research Institute, Tohoku University. Series A:Physics, Chemistry and Metallurgy, 35(2) (1991) 261-274.

[6] Y. Oyama, T. Nakazawa, K. Noda and H. Maekawa; "Radiation induced electric conductivity of alumina insulator and its application to radiation dosimetry in high energy and high flux neutron field", US DOE Rep., (1995) 293-302.

[7] T. Iida, F. Sato, H. Sato, F. Maekawa and H. Takeuchi; "Electrical properties of ceramic insulators under irradiation", Proc. of 1st International Symposium on Supercritical Water-cooled Reactors, Design and Technology, SCR-2000, (2000) 251-556.

[8] C. J. Allan and G. F. Lynch; "Practical consideration for the use of mineral-insulated cables in a reactor enviroment", Trans. Am. Nucl. Soc., 45 (1983) 233-234.

[9] T. Shikama, M. Narui and T. Sagawa; "Radiation induced electromotive force in mineral insulated cable under reactor irradiation", Nucl. Insrum. Meth., B 122 (1997) 650-656.

[10] T. Nishitani, T. Shikama, M. Fukao, H. Matsuo, R. Snider, J. Broesch, N. Sagawa, H. Kawamura and S. Kasai; "Irradiation effects on magnetic probes of mineral insulated cable", Fusion Engineering and Design, 51-52 (2000) 153-158.

[11] 飯田 敏行; "核融合炉機能材料の中性子照射効果に関する調査", 日本原子力研究所 平成 12 年度受託研究報告書.

[12] T. Tanaka, H. Yonezawa, F. Sato, T. Iida, T. Ikeda, S. Okuda, K. Ochiai and T. Nishitani; "Electrical properties of mineral insulated cables under irradiation", The First iTRS International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology, Seoul (Korea), (2001) 270-272.

[13] 米澤久恵, 田中照也, 佐藤文信, 飯田敏行, 池田稔治, 奥田修一, 落合謙太郎, 西谷健夫; "MIケーブルの放射線誘起電気伝導", 第1回先進放射線応用シンポジウム, (2001) 159-161.

[14] S. Okuda, M. Nakamura and K. Yokoyama; "Measurement of the energy loss of an electron bunch passing in a chicane-type bunch compressor due to the coherent synchrotron radiation", Nucl. Instrum. Meth., A 445 (2000) 351-355.

国際単位系（SI）と換算表

表1　SI基本単位および補助単位

量	名　称	記　号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2　SIと併用される単位

名　称	記　号
分，時，日	min, h, d
度，分，秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$1\ eV = 1.60218 \times 10^{-19} J$
$1\ u = 1.66054 \times 10^{-27} kg$

表5　SI接頭語

倍数	接頭語	記　号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名　称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4　SIと共に暫定的に維持される単位

名　称	記　号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1\ Å = 0.1 nm = 10^{-10} m$
$1\ b = 100 fm^2 = 10^{-28} m^2$
$1\ bar = 0.1 MPa = 10^5 Pa$
$1\ Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$
$1\ Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
$1\ R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
$1\ rad = 1 cGy = 10^{-2} Gy$
$1\ rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$

（注）
1. 表1－5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局1985年刊行による。ただし，1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
2. 表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
3. barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
4. EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換　算　表

力	$N(=10^5 dyn)$	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘　度　$1 Pa \cdot s(N \cdot s/m^2) = 10 P$（ポアズ）$(g/(cm \cdot s))$
動粘度　$1 m^2/s = 10^4 St$（ストークス）(cm^2/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	$J(=10^7 erg)$	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal = 4.18605J（計量法）
　= 4.184J（熱化学）
　= 4.1855J（15℃）
　= 4.1868J（国際蒸気表）
仕事率　1 PS（仏馬力）
　= 75 kgf·m/s
　= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

（86年12月26日現在）

核融合炉用無機絶縁ケーブルの中性子照射効果に関する研究（委託研究）