

核融合装置と加速器用コイルの電気絶縁の現状

Recent Technology for Coil Insulations of Nuclear Fusion Devices and Accelerators

日立製作所では、過去に数多くの核融合装置、加速器関係の機器を製作し納入してきた。これらに対しては、種々の形状、絶縁システムの異なったコイルが用いられているが、コイルの電気絶縁の内容については従来ほとんどまとまった形として報告されていなかった。今回、コイル絶縁システムについての説明、特長と絶縁の特性及び実機に適用した場合の代表例の概要について述べる。

安芸文武* *Fumitake Aki*
 神谷宏之* *Hiroyuki Kamiya*
 松延謙次** *Kenji Matsunobu*
 山浦貫治* *Kanji Yamaura*
 門谷建蔵*** *Kenzô Kadotani*

1 緒 言

核融合装置や加速器などのコイルの電気絶縁は、基本的には永い製作実績及び運転実績のある回転電機の高電圧固定子コイルの電気絶縁をベースに、それぞれの機器の特異な形状や要求仕様に耐えるように検討を加え採用してきた。

特に、耐放射線特性では最近 10^{10} radに及ぶ特性要求が現われ始めている。 10^9 radの範囲は絶縁材料の種類も多少限定される程度で、現状の絶縁材料の大部分が使用可能であるという結果を得ているが、 10^{10} radにもなると確認試験が照射試験場所の問題などで遅れており、今後更に検討を要すると思われる。

核融合装置や加速器などのコイルは、装置ごとに形状や仕様が異なり、比較的単純な形状の回転機コイルとは異なった難しさが存在する。日立製作所では昭和35年に1号機を納入して以来、各種の特長ある装置の種々の形状、仕様のコイル絶縁技術を手がけてきた¹⁾。昭和55年には京都大学納めのヘリオトロンE²⁾のような大形コイルとしては特殊な形状のものを完成し、現在は世界最大の規模をもつ日本原子力研究所納めの臨界プラズマ試験装置JT-60³⁾用コイルの設計製作に取り組んでいる。今回、これらのコイルに対する電気絶縁技術と適用例について具体例を挙げ述べる。

2 マグネットコイル用の絶縁システム

これらの装置が使用される環境は、温度、雰囲気(特に放射線を受けること)、機械的、電氣的(特にパルス状電圧電流となること)など、種々の条件が過酷になっている。これらに対して耐える絶縁処理方式の代表的なものは、回転電機用と同じく、全含浸方式、V.P.I.(真空加圧含浸)方式、プリプレグ方式(レジンリッチ方式、セミキュア方式ともいう。)及びレジン塗り込み方式の四つがある。要求仕様、コイル形状、コイル分割部の有無、作業性、信頼性、経済性などを総合的に検討して、どのコイルにはいずれの方式を適用するかを決めている。一つの装置に幾つかの種類のコイルが用いられる場合には、これら四つの方式のうちから最適なものをそれぞれに採用している。

(1) 全含浸方式⁴⁾

この方式は、真空加圧含浸方式の一種であるが、コイルだけでなく鉄心も一緒にレジンの中へ浸して真空加圧含浸を行なうためにこの名称があり、主として誘導電動機などの中小形回転機に広く用いられている。真空加圧含浸タンクが回転機対象で設備化されているので、通常、外形寸法に制約があり

大形の核融合装置用にはあまり適用されないが、他の絶縁システムでは要求特性の実現ができないもの(ヘリオトロンEのヘリカルコイルのようなもの)には特別に装置形状に合った特殊含浸タンクを新製して適用する。接続部分とか固定部分にもレジンが浸透して強固に固着するので、絶縁層は耐湿性、機械的、電氣的特性に優れる。

(2) コイル単体での真空加圧含浸方式⁵⁾

この方式は、回転機では昔から広く用いられている方式で、コイルだけを真空加圧含浸し、その後加熱加圧してレジンを硬化させる。通常、回転機用含浸タンクは径が2~3m、長さ数メートル~十数メートルの円筒形であるため、細長いコイルには適するが径の大きいドーナツ形の大形コイルに対しては適用が難しい。したがって、回転機では大形コイルに広く適用されるが、本装置用には中小形のコイルに適用する。前記(1)に比べて含浸後絶縁層を加圧硬化できるので、より緻密な組織にできる利点がある。

(3) プリプレグ方式⁶⁾

上記(1)、(2)では、接着剤含有量の少ない絶縁テープで絶縁して、含浸工程で絶縁層中へレジンを浸透させるが、本方式では必要レジンを予め絶縁テープに保有させ、Bステージと呼ぶ状態にまで硬化を進めておき、べたつきやレジン流れなどがないようにした、いわゆるプリプレグ状態にしたテープを用いる。このプリプレグ絶縁テープを導体に巻回して、直ちに加熱加圧してレジンを硬化させると、優れた絶縁層ができる。この方式は、材料の性能と加熱加圧のタイミングが非常に難しく、高度の製造技術を必要とするが、製造装置に制約のない点が特長である。

(4) レジン塗り込み方式

この方式は、前記(3)の方式が一般的になる以前、(1)、(2)の方式ではできない大形コイルに広く適用された。前記(3)の方式が一般的になった現在でも、接続部分の絶縁とか、絶縁後加熱乾燥のできないものに適するので、常温乾燥のままで優れた絶縁を得るために広く用いられている。

上記四つの方式に用いるレジンには、有機物のため耐放射線性の点で完全というわけではないが、レジン単独で用いることはほとんどなく、無機質フィラーとの混合、マイカとの併用で実質上 10^9 rad程度の γ 線照射では多少の特性低下を示すにすぎず、実用上は十分な特性をもっていると判断している。

耐放射線性の問題でレジンを限定したり、無機質フィラー

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立工場 工学博士 *** 日立製作所日立研究所

を混ぜるといった研究も行なわれているが⁷⁾、一般に作業性の考慮が不足していることがあり、ある程度の量を用いて経済的に信頼性のある製品を製作することが難しいことが多い。

真空加圧含浸方式では、レジン粘度が非常に重要で、含浸時低い粘度であれば含浸性も非常に良く、通常は含浸温度で5～10P以下程度に管理、適用する。したがって、無機質フィラーなどを含むものはこの程度の低粘度にすることが難しく、十分な含浸を期待できない。また、温度を上げると粘度は下がるので、加温含浸することも考えられるが、残りレジンのポットライフ(使用可能時間)が短縮され、繰返し使用回数が減って経済性が失われることが多い。

最近では、これらの欠点をカバーするためと、製作技術の著しい進歩のため、プリプレグ方式が大幅に適用される。JT-60のトロイダルコイルのような断面約300mm×900mm、直径5,500mmに及ぶ超大形コイルもプリプレグ方式で製作されており、今後のコイル絶縁の主流になると考えている。

3 コイル絶縁の特性

以上いずれの方式も高電圧(約3kV以上)である限り、マイカを主体とした絶縁を採用している。これはマイカが無機質であり、耐コロナ性、耐放射線性及び耐熱性に優れ、かつ適度の柔軟性もあって作業性にも勝っているからである。低電圧用には、ノーメックス(Du Pont社のポリアミド紙)やカプトン(Du Pont社のポリイミドフィルム)などの薄葉材料を、耐放射線性、耐熱性に優れているので使用する。機械的伸びを必要とする高電圧用の絶縁には、カプトンなどが補強用に用いられる。カプトンなどの有機材料は一般に耐コロナ性に問題があるので、高電界下では使用しないように絶縁厚さを配慮する。パルスの電圧で繰返し印加回数など、ある程度仕様がはっきりしているものに対しては、課電寿命を模型試験により確認して用いる。図1にカプトンプリプレグフィルムを半重ね巻きした模型コイルでの課電電圧-時間特性を示した。初期の値(新製したばかりの絶縁層の値)と180℃、30日加熱処理後の値とは大差がなく、耐熱性の良いことが分かる。また、繰返し課電回数を限定すれば、かなり高い電圧まで使用できることが分かる。実際の設計では、他の種々の因子を考慮して安全率をとるので、使用電圧はこのデータよりも低く抑えることにしている。

高温時、電圧印加の状態放射線照射を受けると、絶縁特性はどのように変化するか調べたものを図2に示した。劣化条件としては、劣化なし(これを初期と表示)、熱+電圧、熱+電圧+γ線照射の三つの条件で試験し、一例として絶縁破壊強さのそれぞれの初期値を100%として示した。これから分

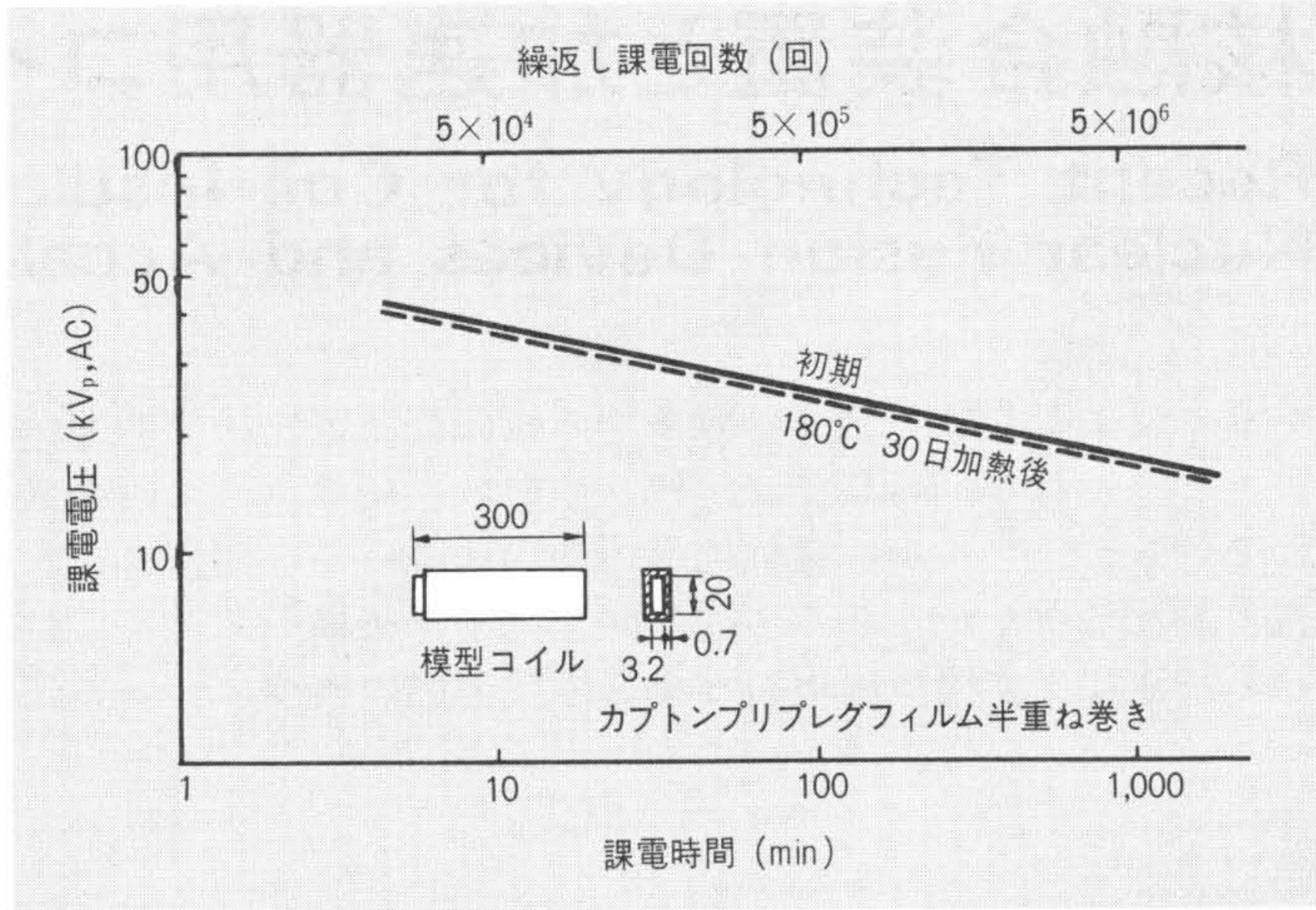


図1 カプトンプリプレグ絶縁コイルの課電電圧-時間特性 耐熱性が良く180℃、30日の加熱処理では特性変化がほとんどない。短い課電時間であれば、かなり高い電圧まで良好な特性を示す。

かることは、複合劣化されても特に著しい劣化傾向はないことであり、他に機械的特性も測定したが、同様な傾向を示していた⁸⁾。

核融合装置では、絶縁層にかなり大きな機械ひずみを要求されることがあり、曲げひずみに対する絶縁劣化の程度を模型コイルを用いて測定した⁹⁾。図3に示したように、コイルを片持ばり状に片端を固定し、他端に固定端絶縁層表面で0.15%ひずみになるような変位を両振りを与えて、繰返し疲労後、絶縁破壊電圧で比較したが、5×10⁴回では特性低下がみられず、また、2×10⁸radのγ線照射後のものも特性低下が認められず、この程度までならば耐えるものと考えている。通常の高電圧絶縁では、こういった曲げひずみは0.03%程度以下であるので0.15%ひずみは非常に厳しい条件であると言える。最近の合成樹脂絶縁は、電氣的劣化よりも機械的劣化が先行して事故に至るケースが多いと考えられ、絶縁の機械的特性評価に日立製作所も力を入れており、コイル絶縁自体の実力を上げることはもちろん、機械的に優れた保持方法を併用して、装置全体の耐機械特性の信頼性を向上するように設計製作している。

また、銅導体間に薄葉絶縁物をはさみ込んでレヤー絶縁を形成し、導体間の絶縁とともに、構造物として接着力を期待するコイルがある。この接着力評価の場合に、従来から2枚の平銅板の間にレヤー絶縁をはさんで両方向へ引っ張り、これを引張り剪断力として接着力を評価するのが一般的であったが、要求特性が厳しくなり、この試験法で得られた値では

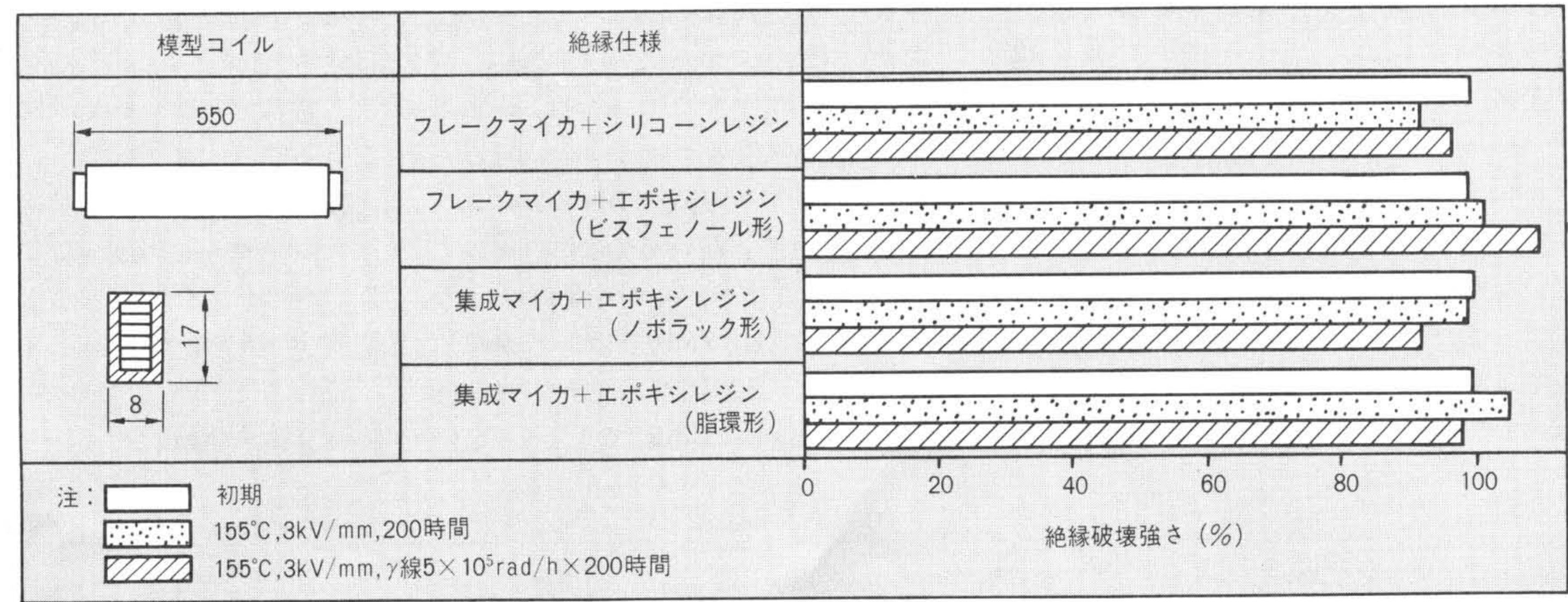


図2 複合劣化条件下のコイル絶縁特性
マイカ絶縁の場合は、10⁸rad照射後でも電圧(3kV/mm)、高温(155℃)と同時印加して特に著しい絶縁劣化の傾向はないことが分かる。

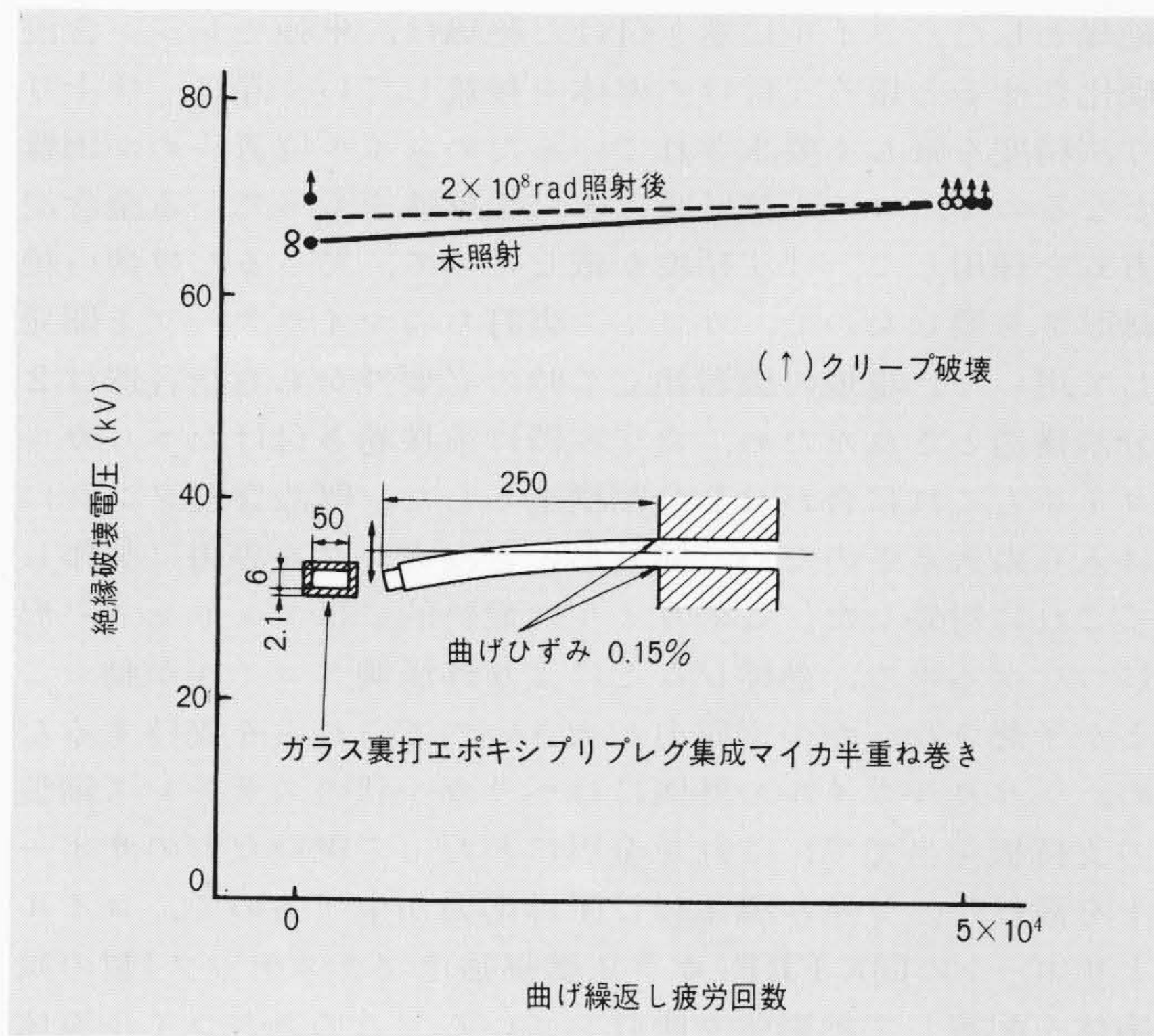


図3 コイルの曲げ繰返し疲労特性 0.15%程度の曲げひずみでは、 5×10^4 回の繰返し曲げに十分耐える。また、 2×10^8 radの γ 線照射後のものでも劣化はないと言える。

低すぎて設計できない場合があり種々検討したところ、実際の運転時には接着面に剪断力だけが働いているわけではなく、これらと直角方向に圧縮力が働いており、両者の印加具合によって実状に近い状態で評価すべきではないか、という考えに至り、圧縮力を印加しながら剪断力を測定する図4に併記した実際的な試験方法を創案した。すなわち、角度 θ の傾斜面をもつ銅片を供試絶縁材で接着した試験片を作製し、同図に示す方向に荷重 P を加えて絶縁層には面圧 σ_n と層間剪断応力 τ_m が同時に作用するようにした¹⁰⁾。同図は、この試験方法によって測定したノーメックスを中央に置き、両側にガラス不織布を配した3層構造のエポキシプリプレグのレイヤー絶縁の層内剪断強さ τ_m と面圧 σ_n の関係を示すものである。絶縁層内の剪断破壊は、すべて中央のノーメックスの内部で生じていた。両側のガラス不織布層と銅の接着、及びノーメックスとガラス不織布の接着はこれよりも良いと言える。同図で、剪断強さは面圧に比例して増大している。これを次式で表わした場合には、 P_0 は接着強さに相当し、 μ は摩擦係数に相当する¹⁰⁾。

$$\tau_m = P_0 + \mu \sigma_n$$

レイヤー絶縁層のノーメックスは、摩擦係数に相当する μ が大きく、そのために面圧下での剪断強さが著しく優れている。高温では接着強さに相当する P_0 が低下するが、 μ はほとんど変わらないため面圧の大きい領域での剪断強さは大きい。

4 高エネルギー物理学研究所納めプロトンシンクロトン主リング電磁石用コイル

これを製造した昭和47年ごろは、まだプリプレグ方式の技術も初期の状態で完全に確立しておらず、顧客の意向もエポキシ真空加圧含浸方式であり、また寸法的にも既設の含浸タンクで十分作業が可能であったので、コイル単体での真空加圧含浸方式で製作した。コイル数も多く、耐放射線性の面で顧客からレジンを推奨があるなど、レジン決定のため種々の検討を加えた。文献上⁷⁾耐放射線性が良いとされたエポキシが推奨されたが、従来日立製作所で使用中の回転機用のエポキシに比べて高粘度であること、当時国内であまり使用例がなく

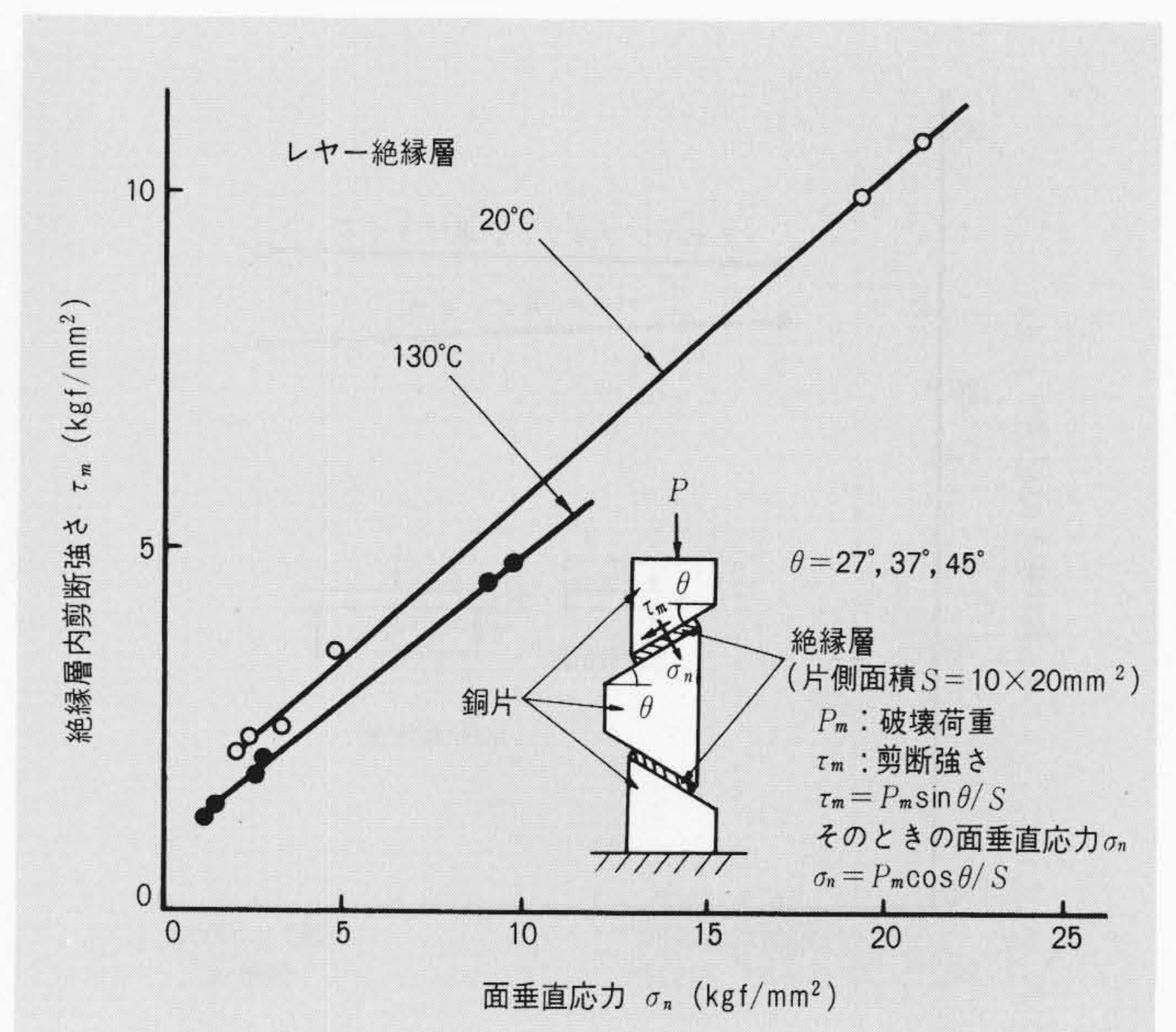


図4 絶縁層内剪断強さ 荷重 P を加えると面圧 σ_n と剪断応力 τ_m が同時に絶縁層に加わる。剪断応力は、面圧に比例して大きくなる。

輸入が必要であること、多量に使うには作業性に心配があることなどの理由で、回転機用エポキシが使用できないか特に耐放射線性の試験を中心に検討した。図5に硬化レジンの曲げ強さによる照射の影響を、図6にマイカとレジンを組み合わせて積層板としたものの曲げ強さによる照射の影響を示した。マイカと組み合わせるとほとんど特性の低下が認められず、十分に耐えられることが確認された。同図中のレジンAが実機に採用されたものである。主コイルは図7に示すようなコイルで、層間絶縁は電圧が低いのでノーメックスを主に用い、アース絶縁は両ガラス裏打集成マイカテープを主に用いて、エポキシレジンを真空加圧含浸している。設置場所

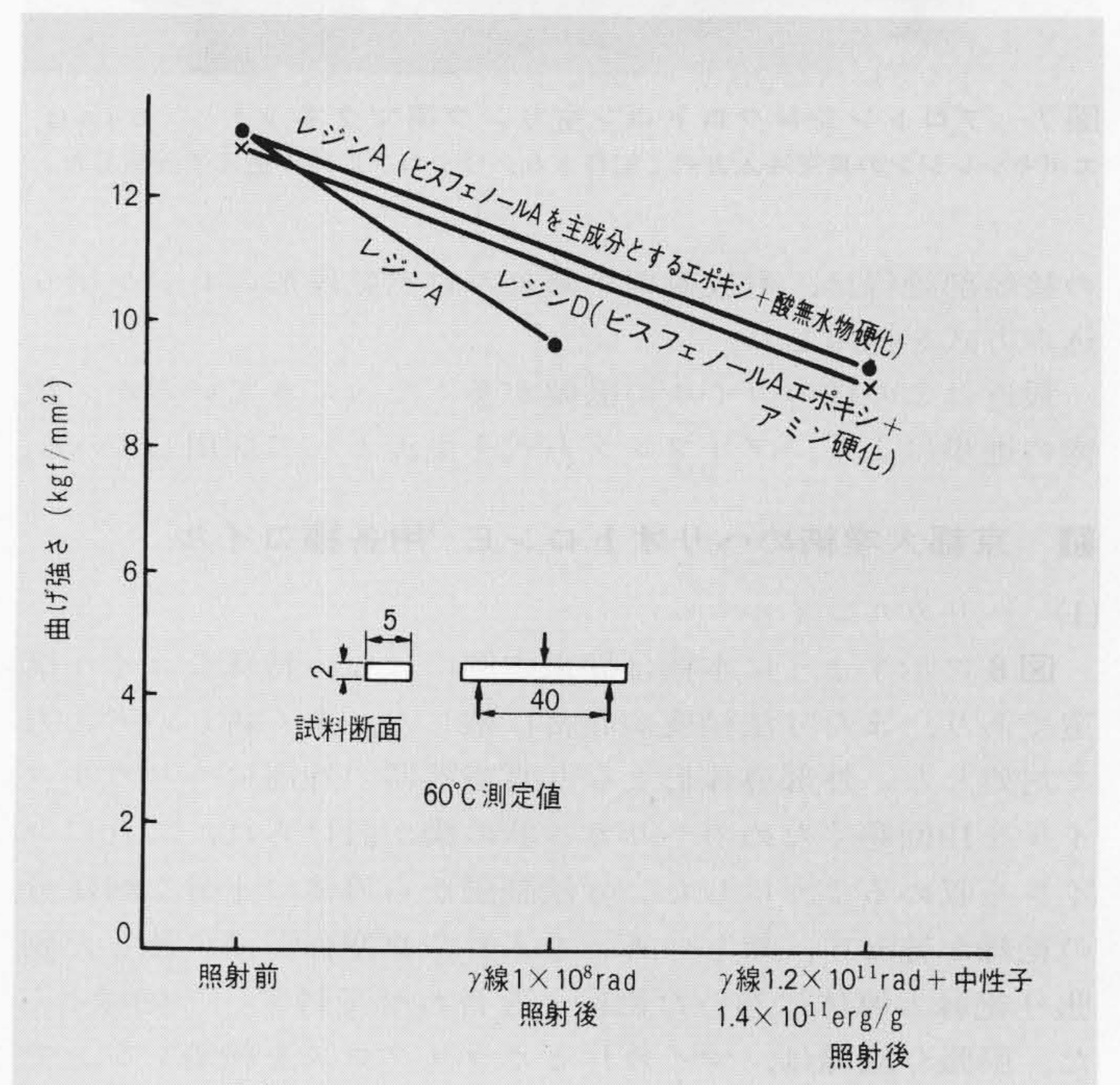


図5 硬化レジンの曲げ特性 まずこの図からレジンAとレジンDの照射後の特性に差がない。次に、レジンAはレジン単独では 1×10^8 rad照射後30%程度低下するが、図6でマイカと組み合わせると低下しないことが分かる。

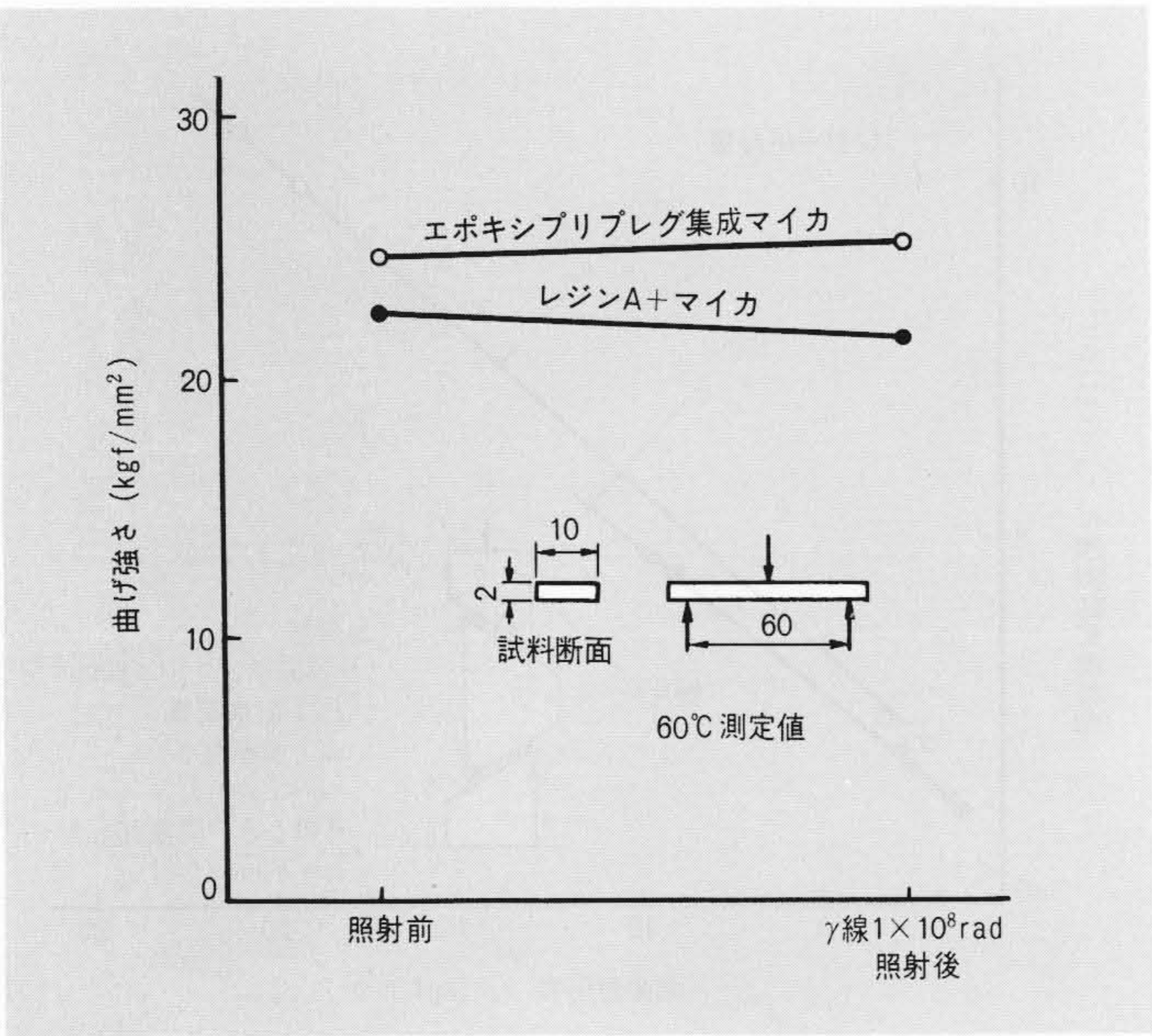


図6 マイカ絶縁層の曲げ特性 図5でレジン単独では照射後、特性低下が見られたが、本図のようにマイカと併用すると低下がほとんどない。プリプレグ絶縁用のマイカも特性低下がない。

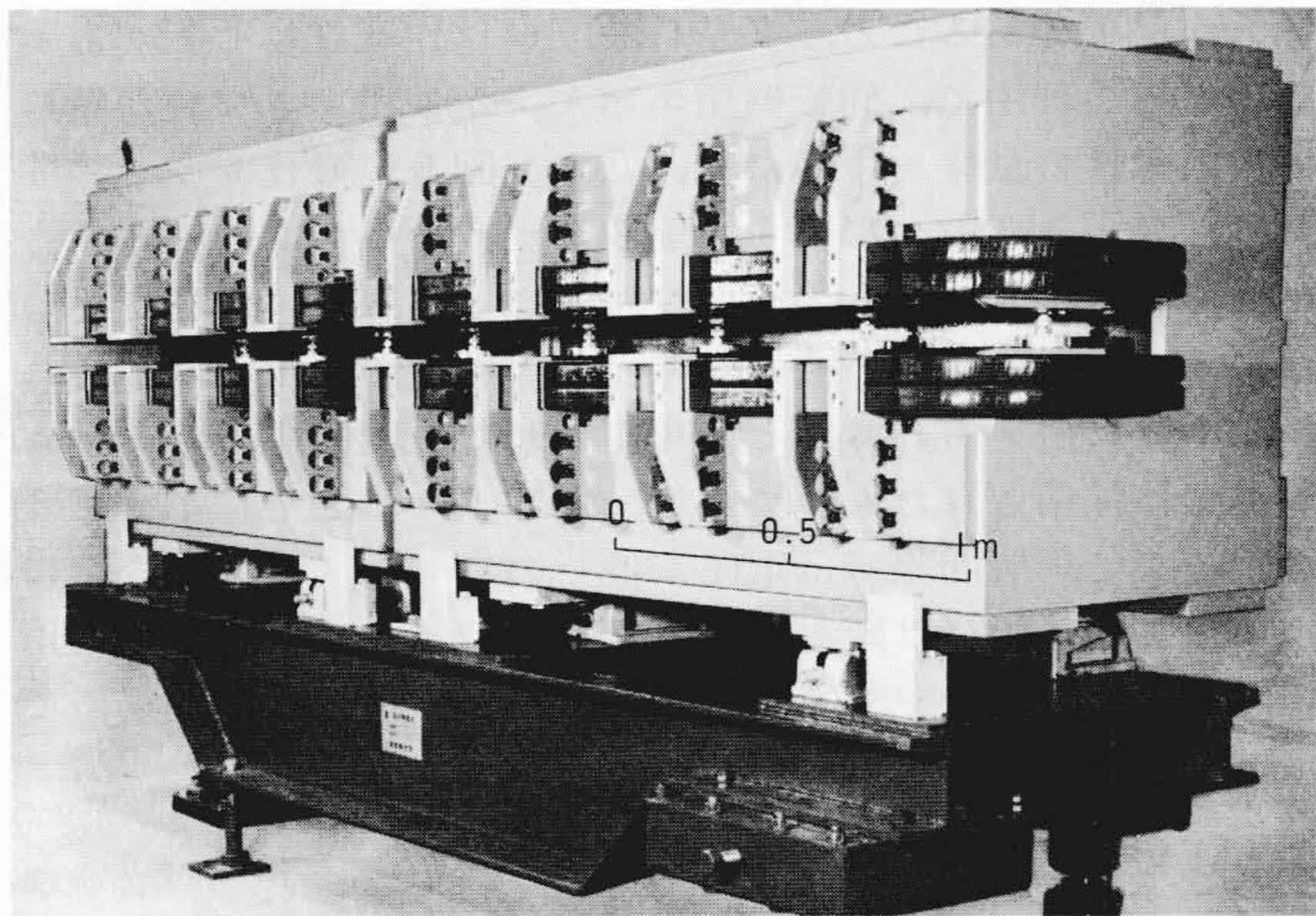


図7 プロトンシンクロトロン主リング用マグネット コイルは、エポキシレジン真空注入方式で製作され、後でコアに組み込んで固定した。

の接続部絶縁は、耐放射線の優れた自然乾燥形のレジン塗り込み方式を採用した。

最近はこの種のコイルの需要が多くなってきているが、技術の進歩により、プリプレグ方式を主流として採用している。

5 京都大学納めヘリオトロンE²⁾用各種コイル

(1) ヘリカルコイル

図8に示すように本機は従来の例にはない特殊なコイル構造であり、また寸法精度が非常に厳しく、全く新しい考え方で対処した。外部導体形となり真空容器の外周にヘリカルコイルを19回巻くためのヘリカル状の溝が設けられ、これにコイルを取めるようにした。寸法制限から導体に十分な耐圧分の絶縁が施せず、新しい考えを入れて真空容器溝に施した胴張り絶縁と導体に巻いた絶縁とを合わせて対アース絶縁とした。胴張り絶縁は、マイカ片とガラスクロスを接着レジンではり付けて全溝にわたり一体化した。導体側には層間絶縁を主に施した、やや薄めの絶縁として寸法を縮小し、コイル断面の両端に位置する導体は、表面沿面耐圧を十分に考慮した

絶縁とした。コイルに巻き付けた絶縁は、単独でレジン含浸硬化させると銀ろう付けで導体を接続していく際に、仕上り寸法精度を厳しく要求されているためコイル位置決めが困難となるので、コイル接続時にまだ柔軟性をもっている全含浸方式を採用した。寸法精度が厳しいので、できるだけ薄い絶縁厚さを要したので、カプトン裏打ちのマイカテープを開発して用いた。現地の機器組立て時の必要性から真空容器は2分割構造とされたため、真空容器に直接巻き付けたヘリカルコイルもこれに合わせ2分割構造とした。既設含浸タンクには入らぬ大きさのため、簡易形の含浸タンクを専用に製作してこれに対処した。このコイルは最終的にはエンドレスの形につながるもので、熱伸びなどにより外径側へコイルが動くことが予想され、かつ電磁力が大きいのでこれらを支持するため、ヘリカルコイルの外側にはヘリカル状のステンレス鋼製の支持板を当てて、これを全周にわたって継いだ形のサポートを設けた。コイル導体には圧縮応力が生ずるので、コイルとサポートの間にFRP(ガラス繊維強化プラスチック)製の緩衝体を配置して熱膨張を吸収している。このときコイル導体

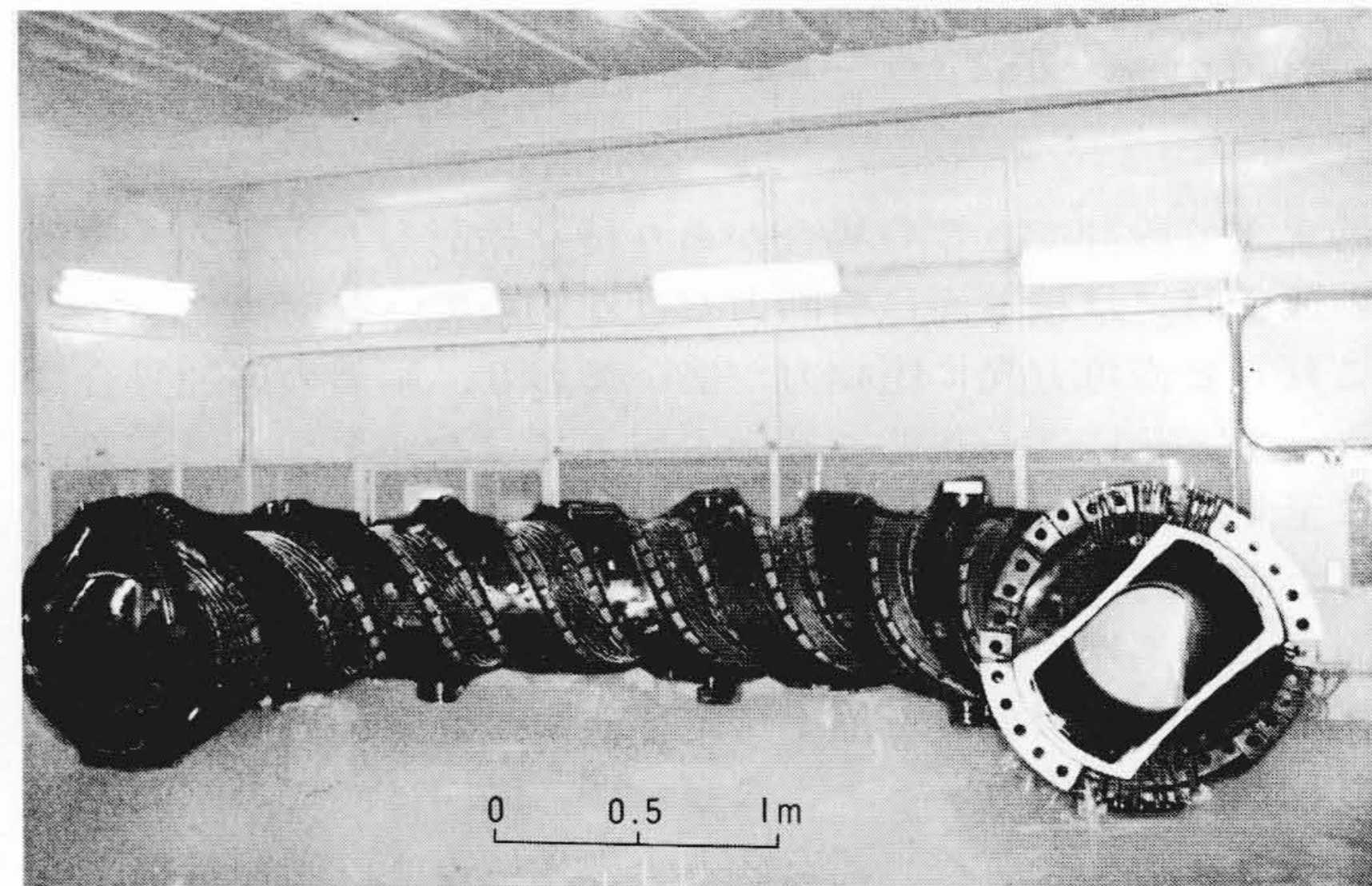


図8 ヘリオトロンE用ヘリカルコイル 真空容器にヘリカルコイル巻付用の溝があり、これに溝絶縁を施して、かつコイルに絶縁をして、ろう付けで導体をつなぎながらコイルを巻き付け、その後コイルと真空容器を特殊な含浸タンク中で一体とした状態で注入を行なう。本図は全含浸後のものを示す。

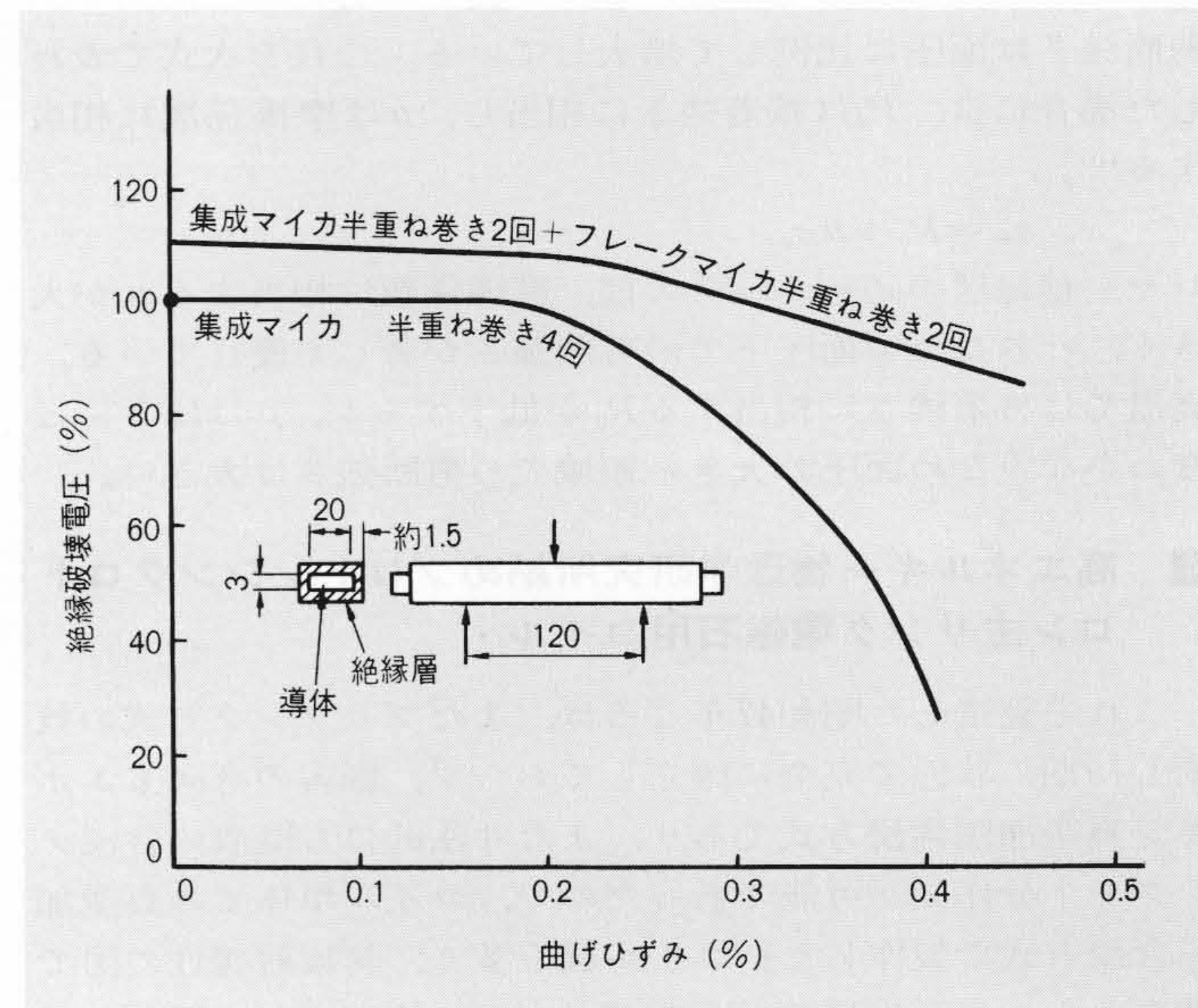


図9 プリプレグマイカ絶縁コイルの機械特性の一例 集成マイカだけの絶縁コイルは、曲げひずみ0.25%程度から絶縁破壊電圧が急激に低下するが、フレークマイカを併用すると倍近い曲げひずみまで耐えることが分かる。

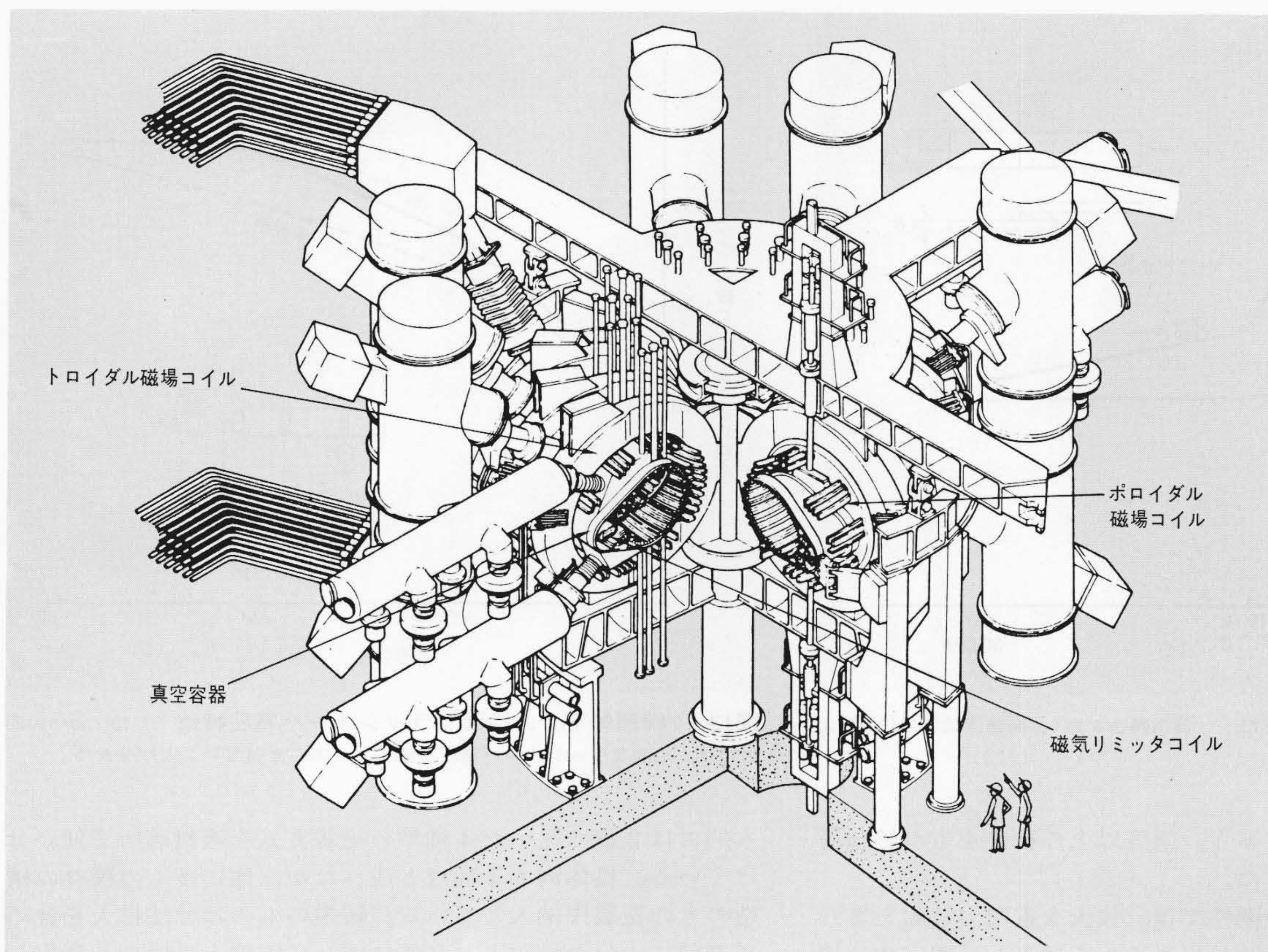


図10 臨界プラズマ試験装置JT-60本体周辺鳥観図 トロイダル磁場コイルと二分割構造のポロイダル磁場コイル，真空容器内に位置する磁気リミッタコイルから成る（日本原子力研究所提供）。

間の相互の動きを考慮して，各々の導体は隣同士で接着しないよう滑りライナを配置して，絶縁層に無理な力がかからぬように配慮した。

(2) トロイダル磁場コイル

このコイルは，導体をフラットワイズ巻きした標準形のコイルであるが，レヤー絶縁にはノーメックスを主体としたプリプレグシートを採用し，アース絶縁にはプリプレグマイカを用いた。加熱硬化は熱収縮テープを巻いた標準硬化方式を用いた。

(3) 空心変流器コイル

対地試験電圧が商用周波交流電圧で64kVと非常に高く，かつ高度な機械的強度も要求された。通常のプリプレグマイカは集成マイカが主体であり，電気的特性は優れるが曲げ強度にやや不安が残るので，フレークマイカのプリプレグテープを開発して用いた。このマイカは，層はく離しやすいので極力使用量を少なくして，効果を挙げるように構成を十分検討した。図9に検討結果の一例を示す。同図から曲げひずみに関してオール集成マイカ絶縁に対し，フレークマイカ層を絶縁厚みの外側の位置へ数層入れることで効果があることが分かる。

6 日本原子力研究所納めJT-60³⁾用各種コイル

図10に各種コイルの組合せを示したが，大別してトロイダル磁場コイル，ポロイダル磁場コイルがあり，後者のうち磁気リミッタコイルは若干異質となる。

(1) トロイダル磁場コイル

図11に本コイルの概略寸法を示したが，導体は(約16～35mm)×270mmの断面をもつ巨大な銅導体を，約半周ごとにろう付けして巻き込んでいく構造である。層間絶縁は両側にガラス不織布付のノーメックスを用い，導体間に挿入し半周ごとに加熱加圧して寸法を出しながら硬化する。ガラス不織布を配した理由は，接着用レジンの保持と寸法調整の目的から採用したものである。接着力特性の測定例を図12に示す。コイルは

図11に示したように，レヤー絶縁が入った状態で先端部をテーパ状に一部切削加工するため，加工時にレヤー絶縁が損傷しないように切削加工性の事前試験を実施し，適正な加工方法を採用した。

アース絶縁は電気的にはマイカ絶縁層で分担し，要求特性の厳しい機械的特性に対してはFRP層で分担する方針とした。マイカ層は内側に30%厚みで，FRP層はその外側に70%厚みで配置する構成とした。これらの材料は製作に先立つR&D (Research and Development)により開発した¹¹⁾。共にエポキシベースのプリプレグ品である。電気絶縁層の機械的強度をもう少し上げておいたほうが良いと判断して，別途開発したフレークマイカプリプレグを一部併用した。これらのプリプレグ材を巻回した後の加熱加圧は，超大形コイルに適正な圧縮力を与えるために開発した強力な熱収縮テープを使用して，

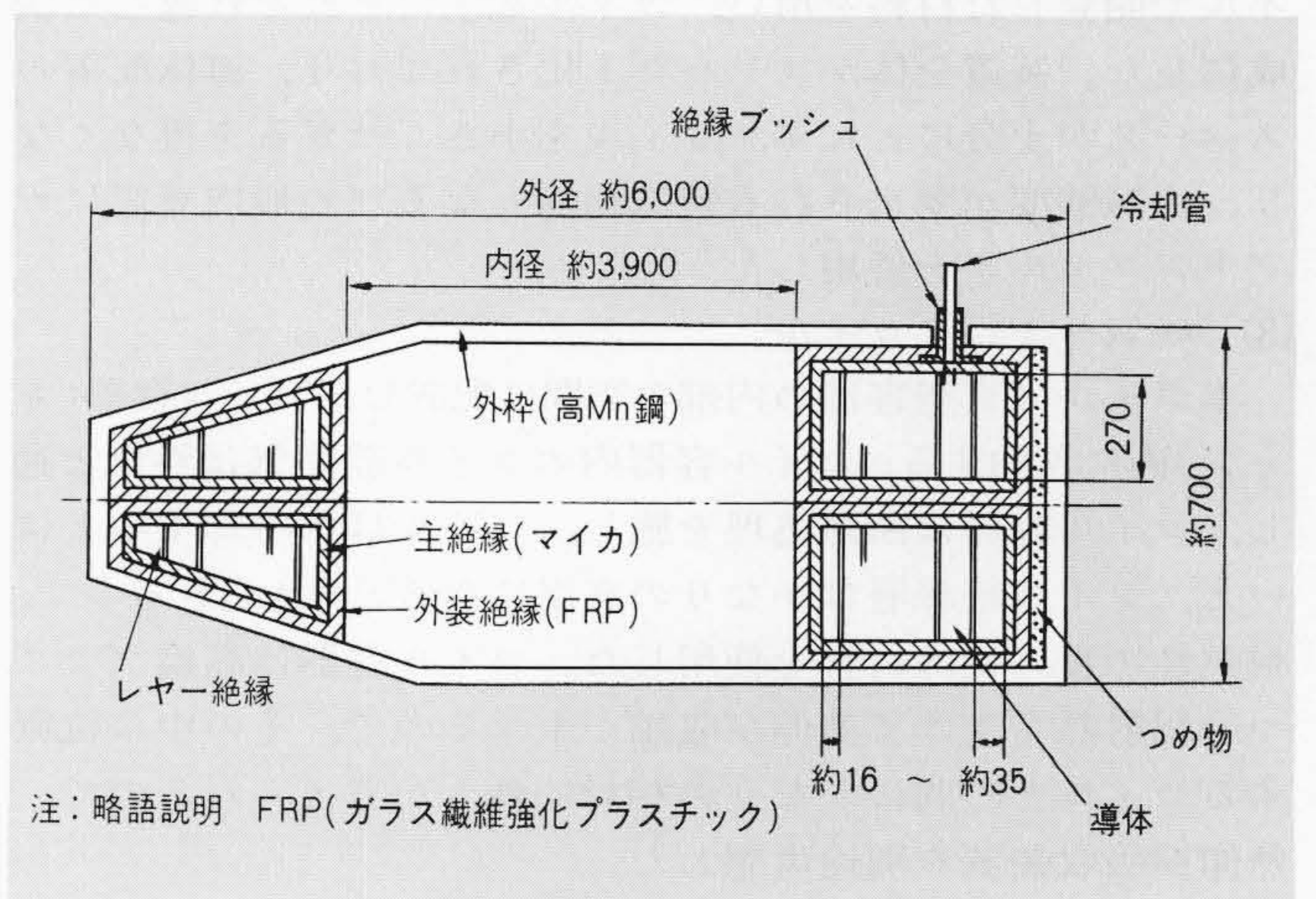


図11 JT-60用トロイダル磁場コイル概略断面図 外径約6mの巨大なコイルである。図で左側部分がテーパ状に加工製作されている点が特異である。

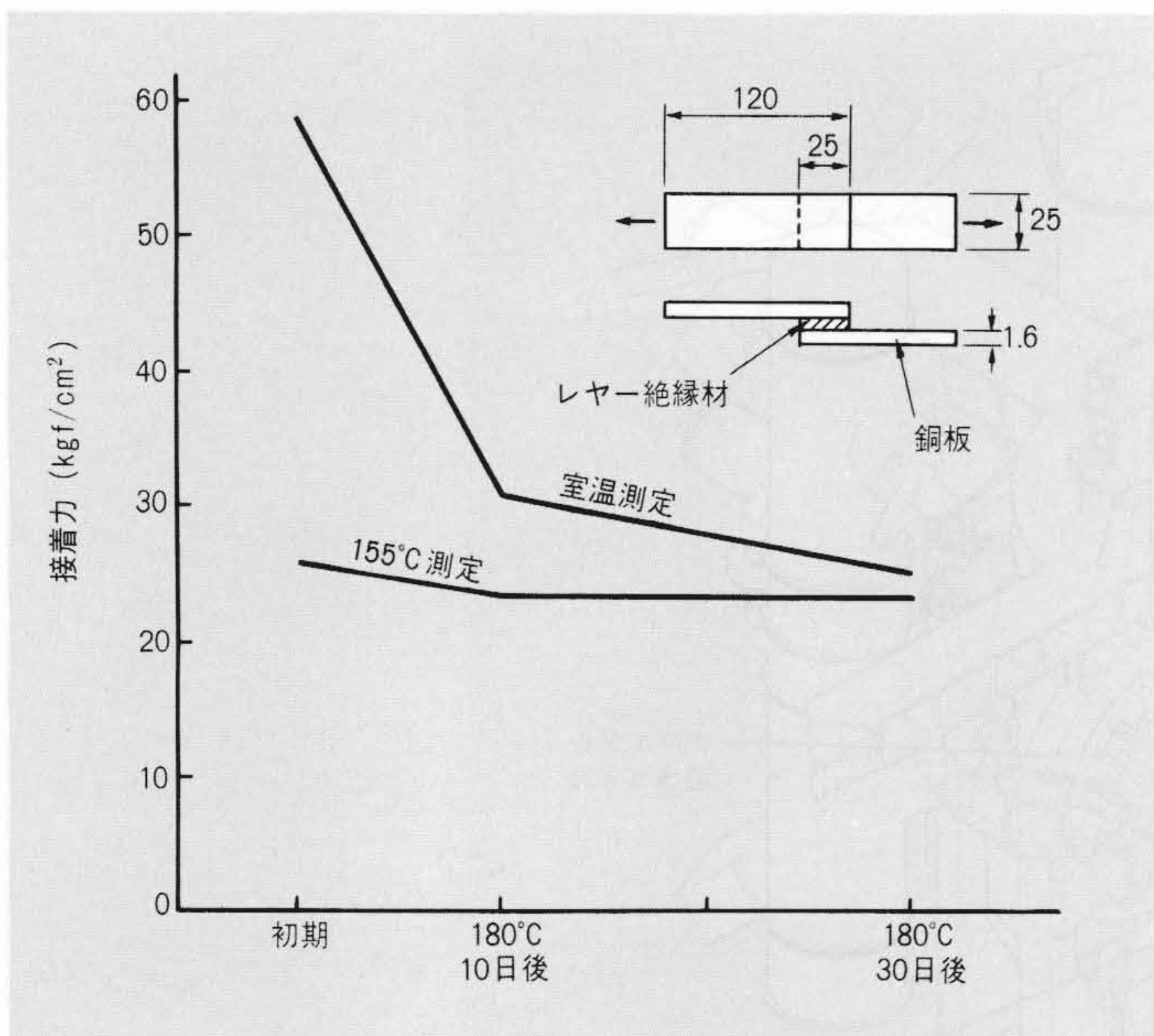


図12 レヤー絶縁接着力特性 高温特性が良く、高温連続使用にも耐える材料であることが分かる。

油圧金型締付けで製作すると、同等以上の特性をもつ絶縁層を形成することに成功した。

銅導体と絶縁層だけの剛性では、強大な電磁力に耐えきれないので、非磁性鋼の補強棒にコイルを挿入して固定する構造をとった。

(2) ポロイダル磁場コイル

ポロイダル方向の磁場を生じさせ、プラズマの発生、制御を行なうための電流を流すコイルで、空心変流器コイル、垂直磁場コイル、水平磁場コイル、四重極磁場コイルなどがあり、これらは真空容器の外に配置されている。磁気リミッタコイルは真空容器内に配置される。これらのコイルのうち、最高使用電圧のものは空心変流器コイルで30kV_pである。トロイダル磁場コイルとの相対位置の関係で、ポロイダル磁場コイルはすべて分割構造となっており、現地据付け時に接続作業、絶縁作業を実施する難しい構造になっている。放射線が照射された状態で、接続部での表面フラッシュオーバー電圧の低下を心配して日本原子力研究所が中心となり模型試験を実施したが、結果は図13に示すように、特に低下することなく適正な設計資料が得られた¹²⁾。主絶縁材料はトロイダル磁場コイルで開発した材料を用い、コイル電圧にそれぞれ適した構成にした。装置全体がコンパクト化されており、導体配置のスペースが十分にとれず、コイルを小さくせざるを得なくなり、機械強度が要求される特殊絶縁となるため最内層側にカプトンフィルムを併用した。

(3) 磁気リミッタコイル

本コイルは真空容器の内部の空間に配置し、コイル容器(キャン)内に収納する。コイル容器内のコイル雰囲気は外気と通じ、コイル容器は断熱処理を施し、コイルは水冷却するとはいえ、コイル絶縁層はかなりの高温になると考えられるので、耐熱性の良い絶縁材料を使用した。コイル容器は高温プラズマの輻射熱を受けて熱伸び収縮が生ずるので、その中に位置するコイルとの間にかなりの相対的動きが考えられるので、熱伸び吸収装置を別途考慮した。

7 結 言

核融合装置や加速器などのコイルは多種多様であるが、基

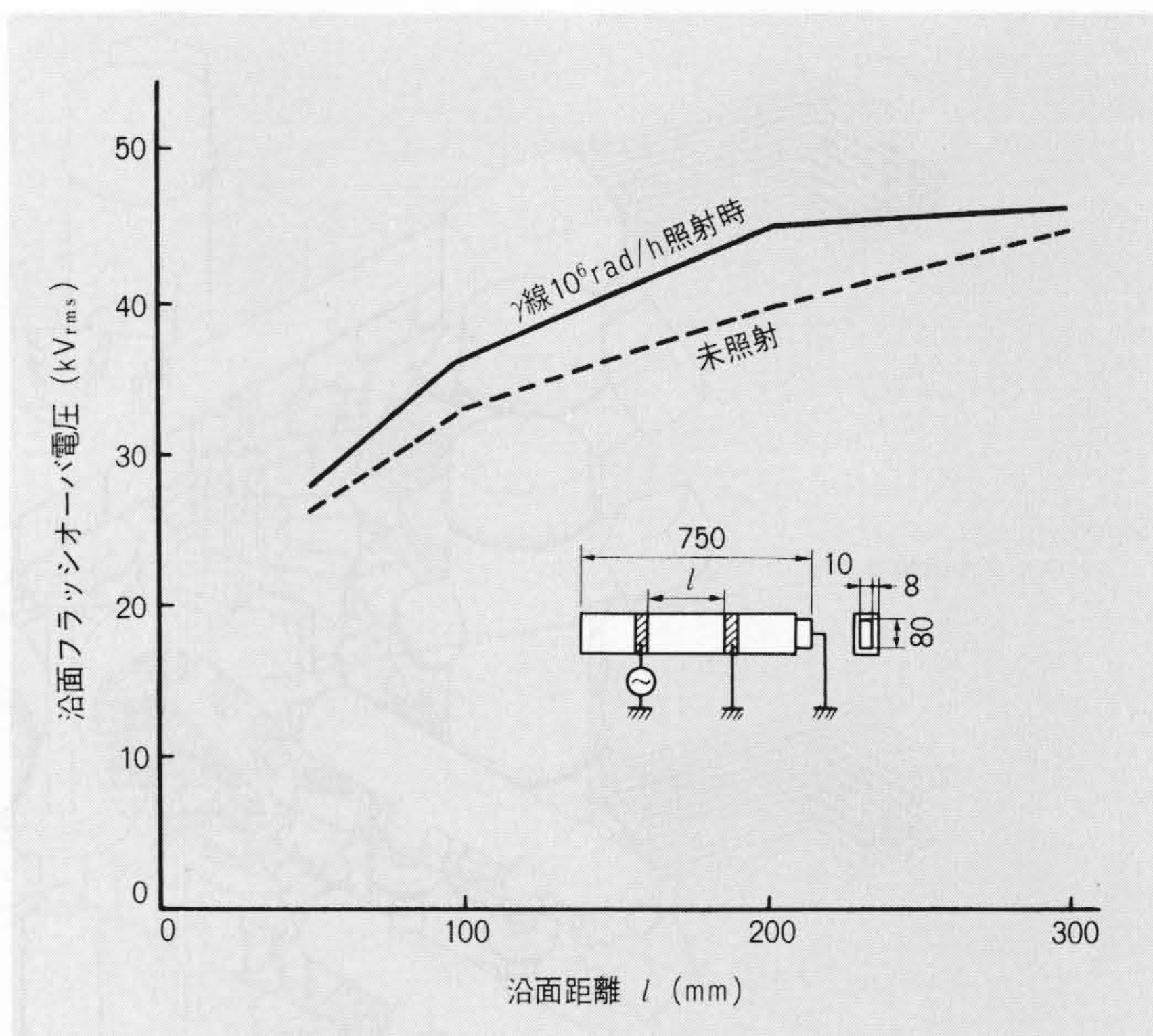


図13 γ線照射下での沿面フラッシュオーバー電圧特性 10⁶rad/hの照射では、沿面フラッシュオーバー電圧を低下させることはないことが分かる。

本的には2章で述べた4種類の絶縁方式を適材適所で使い分けている。具体例も3種ほど述べたが、他に多くの種々の構造のものを製作納入している。新規のものは寸法拡大を含めて事前に十分な検討と、必要に応じて実機大の模型を製作して事前試験を行ない、製造期間の短縮化と信頼性の確認に意を尽している。電気絶縁技術は材料、研究、設計、作業及び検査各専門家の総合力が最も要求されるものの一つであり、電線メーカー、絶縁材料メーカーからも絶大な協力を得て、現在までに優れた製品を製作してきた。

終わりに、これら機器の製作に当たり、種々の御指導、御協力をいただいた関係各位に対し、心から謝意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 岸野, 外: 核融合の最近の動向と日立の役割, 日立評論, 62, 315~318(昭55-5)
- 2) 宇尾, 外: 核融合装置「ヘリオトロンE」の技術開発, 日立評論, 62, 345~348(昭55-5)
- 3) 斉藤, 外: 臨界プラズマ試験装置「JT-60」の製作, 日立評論, 62, 349~354(昭55-5)
- 4) 袴田, 外: ハイパクトエポキシ絶縁—最近の高圧電動機用無溶剤ワニス注入マイカ絶縁, 日立評論, 52, 119~122(昭45-2)
- 5) 安芸, 外: 大形回転機固定子コイル用スーパーハイレジン絶縁方式, 日立評論, 55, 679~682(昭47-7)
- 6) 藤本, 外: 大形回転機固定子コイル用ハイモールド絶縁方式, 日立評論, 54, 611~613(昭46-7)
- 7) H. Brechna: Effect of Nuclear Radiation on Organic Materials; Specifically Magnet Insulations in High-Energy Accelerators (1965-3)
- 8) 保月, 外: 回転機絶縁線輪の放射線劣化, 第7回電気絶縁材料シンポジウム予稿集, 電気学会, 207~210(昭49-9)
- 9) 門谷, 外: 核融合装置用コイル絶縁の放射線照射と機械的疲労, 昭和54年電気学会東京支部大会, 59(昭54-11)
- 10) 門谷, 外: マイカ絶縁の環境劣化, 電気学会絶縁材料研究会, EIM-78-40(昭53-5)
- 11) 大久保, 外: 臨界プラズマ試験装置の試作開発(1), 原子力学会誌, 20, 195~206(昭53-3)
- 12) 佐藤, 外: 放射線照射下における沿面放電特性, 昭和54年電気学会東京支部大会, 60(昭54-11)