U.D.C. 621.315.221.8 : 621.039.577

# 原子力発電所用ケーブルの開発

# Development of Cables for Nuclear Power Generating Stations

栗山　将* *Isamu Kuriyama*
長谷川徹** *Tôru Hasegawa*
小椋二郎*** *Jirô Ogura*
大西隆雄**** *Takao Ônishi*
木村　洋**** *Hiroshi Kimura*

原子力発電所の建設が促進され安全性の追求が厳しくなるなかで，アメリカでケーブルの認定試験規格が新しく制定された。この規格に合格するケーブルを開発するため，耐放射線性材料の開発を行なうとともに，新しく試験設備を設置してケーブルでの特性確認を行なった。その結果，我々のケーブルが十分な性能をもっていることを確かめた。

本稿は，この規格の特徴である二つの要求性能試験を中心に述べる。一つは40年間の通常運転後に事故が1回発生した場合を想定した一連の試験であり，他の一つはグループになった多条ケーブルが火災を伝搬させないことを確かめる試験である。これら両特性を満足するためには，耐熱性，耐放射線性及び耐高温水蒸気性が優れ，しかも難燃化した架橋ポリマ材料を使用する必要を確認した。

## 1 緒　言

最近の世界的な石油危機を契機として，原子力発電の必要性がますます高まり，発電所の建設計画が促進されている。同時に単基出力の大容量化と安全確保システムの拡充に伴い，使用されるケーブル量が飛躍的に増大し，1基当たり1,000 kmを超えるに至っている。一方，運転実績を積むにつれ信頼性の向上，安全性の確保について技術的進歩・改善が目覚ましく行なわれ(1)，安全基準がいっそう厳しいものに変遷してきている。

近年，アメリカではプラント火災の経験から，グループとしてのケーブルの難燃性，特に火災を伝搬させないことについての要求が高まってきた。また，原子力発電所の設計上想定される事故の一つとしての冷却材喪失事故(Loss of Coolant Accident，以下ＬＯＣＡと略す)に対しても安全確保上の重要項目にケーブルが取り上げられ，品質認定の基準化の検討が行なわれてきた。このような情勢を反映し，1974年に至り原子力発電所用クラスIEケーブルの型式試験規格IEEE(アメリカ電気電子技術者協会)-383(2)が制定された。

これに対する挑戦は，アメリカで幾つか行なわれている(3)。しかし，我が国ではこの新しい規格に従い，確実に試験を実施した例はまだない。

筆者らはこの規格を満足するケーブル被覆材料を開発するため，特殊法人日本原子力研究所(以下，日本原子力研究所と略す)と共同研究を進める一方，新しい試験方法に用いるＬＯＣＡ模擬試験設備，及び垂直トレイ燃焼試験設備を設置して検討を行なってきた。

本稿は，これらの検討結果をもとにIEEE-383の要求性能を満足することを目標に開発したケーブルの試験結果の概要を報告するものである。

## 2 原子力発電所用ケーブルに対する要求条件

IEEE-383では，**表1**に示すようなケーブル及びサイズを試験の対象にあげている。なかでも代表的な制御ケーブルについて，**図1**に示すような試験が要求されている。

通常運転に対する品質認定のため，耐熱・耐湿性試験では一般の工業規格を満足すること，老化試験では原子炉の寿命である40年間に相当する熱老化を促進して行なうことを提案している。しかし，具体的な温度・時間について規定がなく，今後の課題としている。

ＬＯＣＡ模擬試験は，原子炉の寿命末期にＬＯＣＡが発生した場合でも確実に原子炉を停止し，汚染性物質を一次格納容器(以下，ＰＣＶと略す)内に封じ込めることなどを目的としたクラスＩＥと称する系統のケーブルが，ある期間機能を

表1　型式試験用代表ケーブル及びサイズ　各対シールド信号ケーブルは，シールド付対より品について垂直トレイ燃焼試験を除く項目が対象となる。

| ケーブル種類 ＼ 試験項目 | 耐熱・耐湿性試験 | 熱・放射線曝露試験 | LOCA模擬試験 | 垂直燃焼試験 | 垂直トレイ燃焼試験 |
|---|---|---|---|---|---|
| 高圧動力ケーブル（単心，トリプレックス，多心） | — | — | — | — | 14mm²(2～5kV)<br>60，100mm²(2～15kV) |
| 単心低圧動力ケーブル<br>多心制御ケーブル<br>多心信号ケーブル（シールド付） | 単心<br>2，3.5mm² | 単心，多心<br>2，3.5mm² | 14，22，30mm²<br>単心，多心<br>2，3.5mm² | 単心<br>2，3.5mm² | 7心<br>1.25，2，3.5mm² |
| 同軸ケーブル<br>特殊計装ケーブル | 実サイズ | 実サイズ | 実サイズ | 実サイズ | — |
| 1対補償導線 | 0.5mm²，実サイズ | 0.5mm²，実サイズ | 0.5mm²，実サイズ | 0.5mm²，実サイズ | 0.5mm²，実サイズ |

* 特殊法人日本原子力研究所高崎研究所技術開発課 課長 工学博士　** 日立製作所電力事業本部計装技術本部　*** 日立電線株式会社研究所
**** 日立電線株式会社日高工場

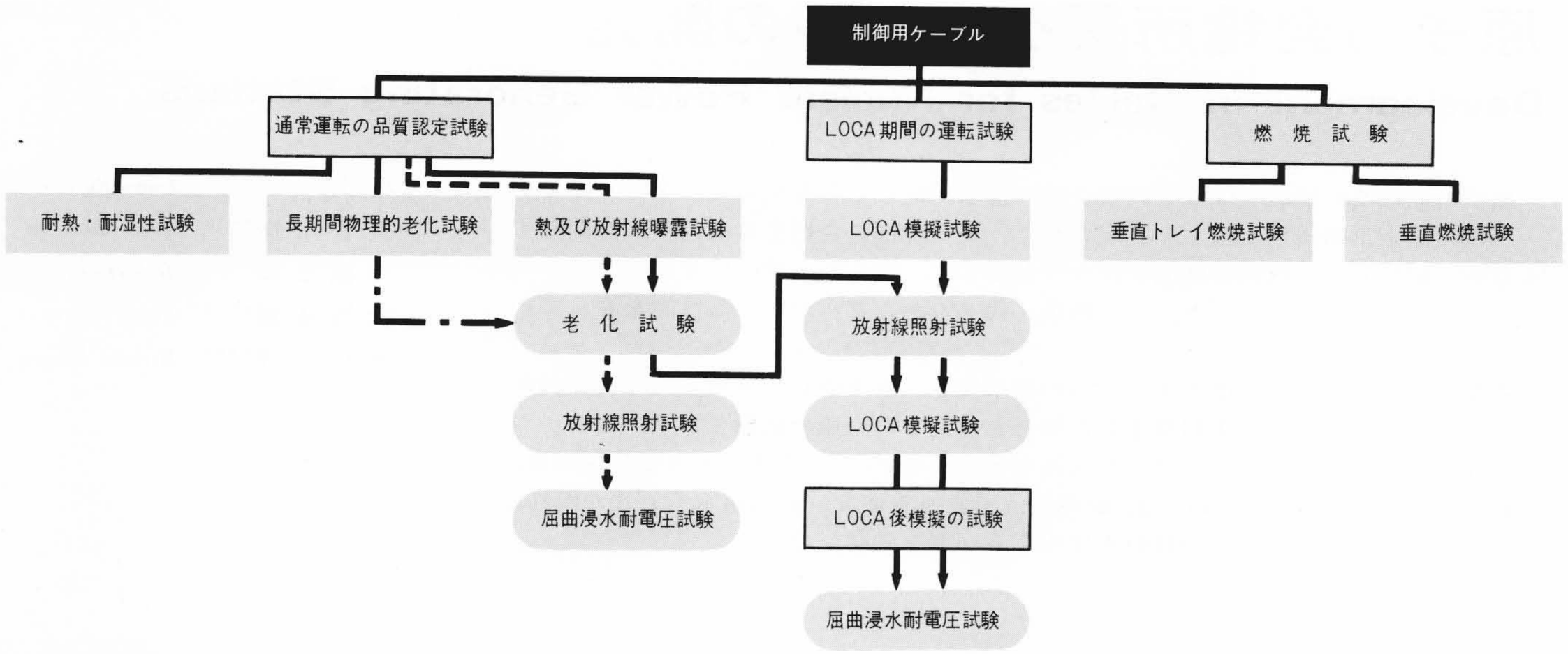



**図1 型式試験のフローチャート** 老化試験後にLOCA模擬試験を経過する試料はより厳しい条件となるため，熱及び放射線曝露試験は省略することができる。

発揮し続けることを保証するための試験である。ＬＯＣＡ模擬条件は，IEEE-323[4]を参照することが規定されており，これは原子炉型式や個々のプラントにより異なるが，沸騰水型炉(以下，BWRと略す)と加圧水型炉(以下，PWRと略す)の厳しい条件を合成したうえ，更に裕度として高温度のピークを追加して二つのピークをもつプロフィールを勧告している。IEEE-383では，ＬＯＣＡ模擬試験の対象はＰＣＶ内のケーブルに限定している。しかし，IEEE-323ではＢＷＲの場合にはＰＣＶ外にも緩和されてはいるが，ＬＯＣＡ条件があることを注意している。ちなみに，ＢＷＲのＰＣＶ内の環境条件例は，**図2**に示すとおりである。

垂直トレイ燃焼試験は，多条ケーブルが垂直に布設された状態で，主として外部要因によるケーブル火災時に，燃え広がらないことを保証する試験である。火源としてプロパン ガスか都市ガスを用いてリボン バーナで燃焼する場合と，代案として油浸麻布を使う場合とを提示しているが，再現性及び均一な熱量を与える点から，プロパン ガスを使用するのがよい。

垂直燃焼試験は，多心ケーブルの中から絶縁線心1条を取り出して行なうもので，いわゆるアメリカのＵＬ規格の燃焼試験と同じで，小サイズの線心にとって厳しく，難燃性ケーブルとしてこの試験に合格することが要求される。

ケーブルを燃焼した場合に，例えばビニルを使っていれば多量の煙と塩化水素ガスのような腐食性生成物が発生する。これまでのケーブル火災では，これら腐食性生成物による二次的被害が大きく，この規格では具体的な規定はないが，今後の課題として取り上げている。従って，電気特性，物理特性及び耐ＬＯＣＡ特性を犠牲にしない範囲で，腐食性生成物の発生量を低減した，延焼性のないケーブルが要求されることになる。

## 3 ケーブル仕様

### 3.1 材料の選定

(1) 我々は共同研究で，電気特性を低下させず，難燃性でしかも放射線ばかりでなく熱－放射線－高温水蒸気の組合せ環境条件下で，バランスのとれた高度の性能を保持するような絶縁材料の開発について検討を行なった[5]。ここでは，これらの要求性能を満足する材料の一つとして架橋タイプの難燃

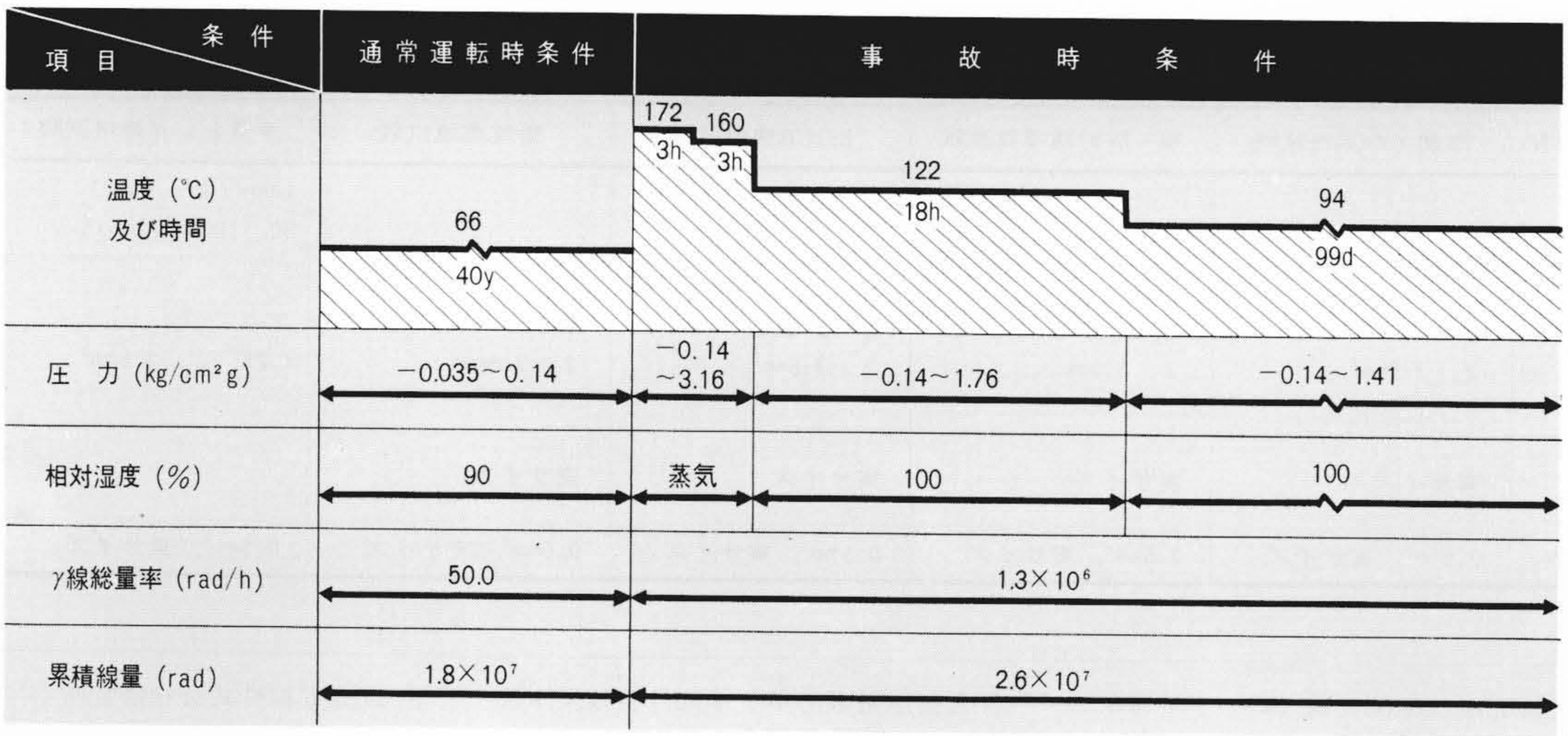



**図2 BWRのPCV内の環境条件例** BWRの最も厳しい環境条件を示している。40年間の通常運転後，事故1回分の合計した累積線量は$4.4\times10^7$radになる。

性ポリオレフィンを取り上げた。前述したように，絶縁線心として垂直燃焼試験に合格することが要求される。この要求を満足する絶縁材料の難燃度は，JIS K 7201の酸素指数で少なくとも約27が必要であった。

(2)　シースは，ケーブルの垂直トレイ燃焼試験を満足するために重要な役割を果たすと同時に，LOCA環境においてケーブルの死命を制するものである。難燃性と耐LOCA特性を満足するためには，充填剤，安定剤などの配合剤の十分吟味された架橋タイプ ハロゲン化ポリマ材料が必要である。

(3)　ケーブルとしての難燃性やLOCA模擬の高圧水蒸気条件に対して，ケーブル副材料である介在やバインダ テープの選定も重要である。

### 3.2　供試ケーブル

**表2**に制御ケーブルの構造を示す。供試試料A，B，Cは同一構造であるが，ベースポリマの種類及び配合の異なるシース材料(A，B，C)を用いたものである。

## 4　LOCA模擬試験特性

### 4.1　試験方法

**図3**はLOCA模擬試験のスケジュールを示したものである。

(1)　老化試験は空気オーブン中で121℃7日間の条件で行なった。この条件はIPCEA規格のEPゴム，又は架橋ポリエチレン絶縁体材料の老化条件である。

(2)　放射線照射は日本原子力研究所高崎研究所の$^{60}$Co-$\gamma$線照射共同利用施設で行なった。試料について吸収線量を実測のうえ$1\times10^{6}$rad/hの線量率で，常温空気中で照射した。全吸収線量は$5\times10^{7}$radと$2\times10^{8}$radの2とおりとし，それぞれBWRとPWRの被曝線量を想定した。

(3)　LOCA模擬試験は，試料を**図4**に示す設備で，高温・圧力条件下で，絶縁抵抗測定時を除いて連続して定格電圧・電流を印加した。

(4)　屈曲浸水耐電圧試験は，LOCA後の試料を取り出しケーブル外径の20倍径のマンドレルに沿って屈曲し，常温水中に浸せきして，3 kV/5 minの耐電圧試験を行なった。

表2　制御用ケーブル構造寸法表　JCS329(EPゴム絶縁ケーブル規格)に準拠した構造で，初期特性は十分満足するケーブルである。

| 項目 | | 単位 | 仕様 |
|---|---|---|---|
| 公称電圧 | | V | 600 |
| 線心数 | | 心 | 7 |
| 導体 | サイズ | mm² | 3.5 |
| | 構成 | 本/mm | 7/0.8 |
| | 外径 | mm | 2.4 |
| 絶縁体厚 | | mm | 0.8 |
| より合せ外径 | | mm | 約12 |
| 押え巻テープ厚 | | mm | 約0.2 |
| シース厚 | | mm | 1.5 |
| 仕上外径 | | mm | 約17 |
| 最大導体抵抗(20℃) | | Ω/km | 5.52 |
| 試験電圧(AC) | | V/1 min | 1,500 |
| 最小絶縁抵抗(20℃) | | MΩ-km | 500 |

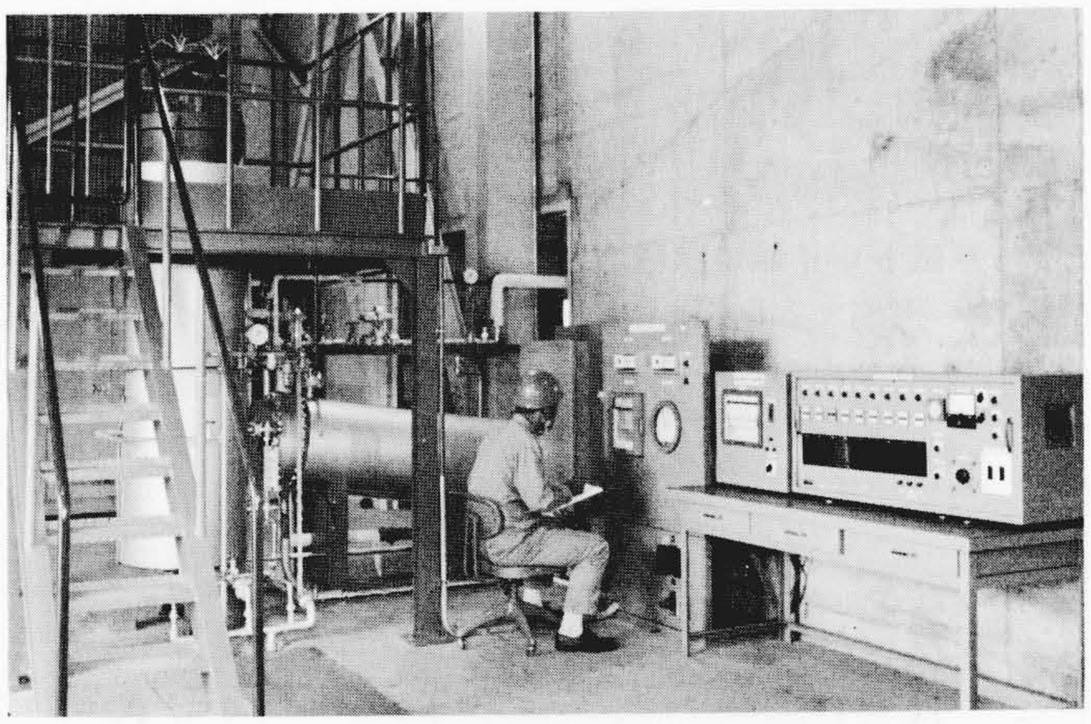


図4　LOCA模擬試験装置　試料は縦形の圧力容器にU字形に設置し，両端末は容器を貫通して外側に取り出し，課電・通電する。圧力容器内ふんい気の温度及び圧力は連続記録する。

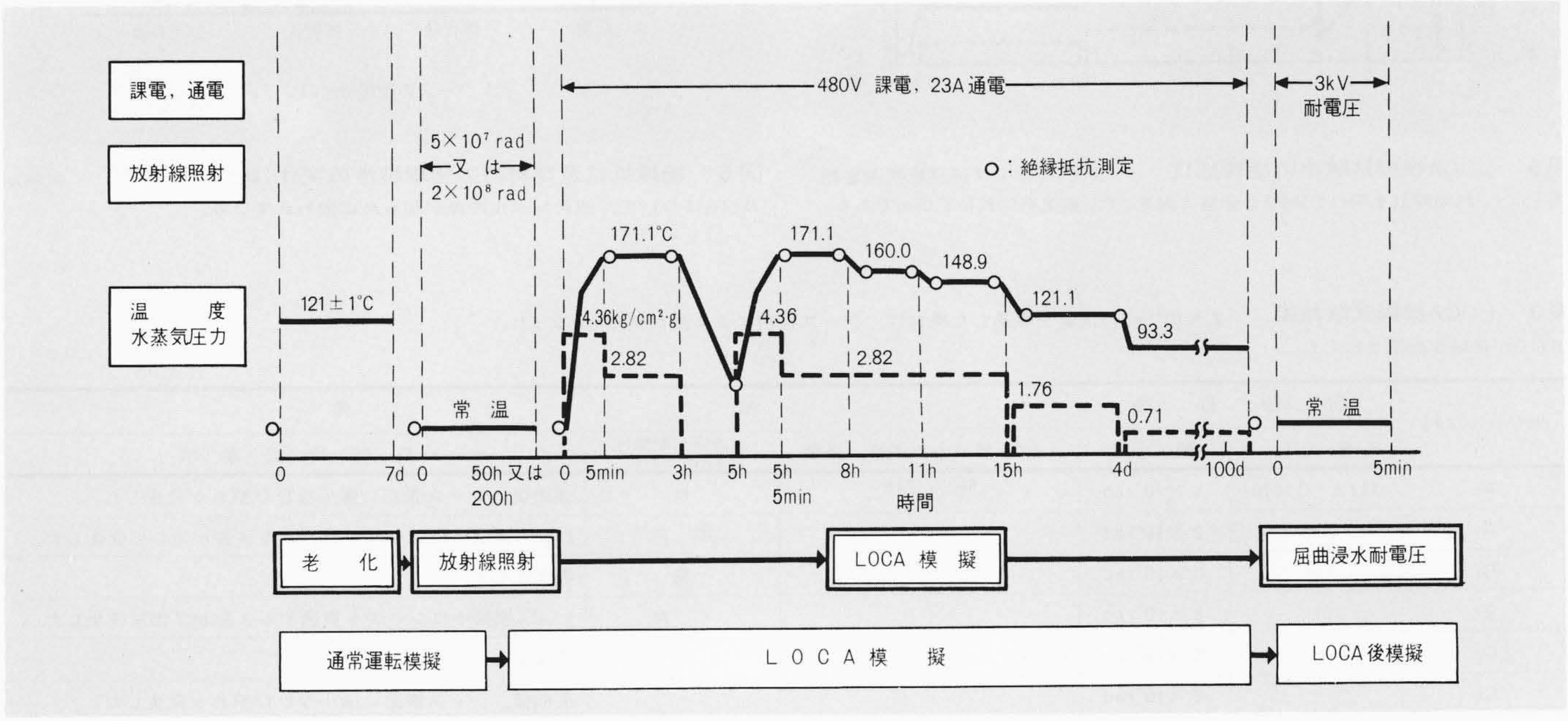



図3　LOCA模擬試験スケジュール　供試試料長4 mのケーブルについて，各場面をシリーズに経過して試験を行なった。

### 4.2　試験結果

**表3**は供試試料の試験条件と結果の概要を示したものである。

(1)　5×10⁷radを照射した試料はいずれも合格した。**図2**のＢＷＲの条件を十分満足する。

(2)　2×10⁸radを照射した場合は試料Ｃだけが合格した。試料Ａ及びＢはLOCA中の課電・通電は可能であるが，LOCA中にシースの貫通き裂が発生しており，屈曲浸水耐電圧で不合格となった。試料Ｃにおける老化の有無の差は明確に出ていない。

(3)　ＬＯＣＡ中の絶縁抵抗は，**図5**に示すように温度による影響が現われている。

### 4.3　耐LOCA特性の検討

**図6，7**は熱劣化，放射線劣化及び水蒸気劣化の各過程における絶縁抵抗と絶縁・シース材料の特性変化を示す。

絶縁抵抗と材料の伸びは，特に照射量による影響が大きい。2×10⁸radの場合は，シースの伸びが100%以下になり引張強さが低下している場合，ＬＯＣＡ中にき裂が発生している。シースに貫通き裂が発生した場合，絶縁抵抗の低下が大きい。このようにシースの耐ＬＯＣＡ特性によりケーブルの良否が支配される。

## 5　燃焼試験特性

### 5.1　垂直トレイ燃焼試験方法

試験を実施するに当たり，周囲の風や気温などの外的要因を排除するため，専用の試験室が必要であった。ケーブル試

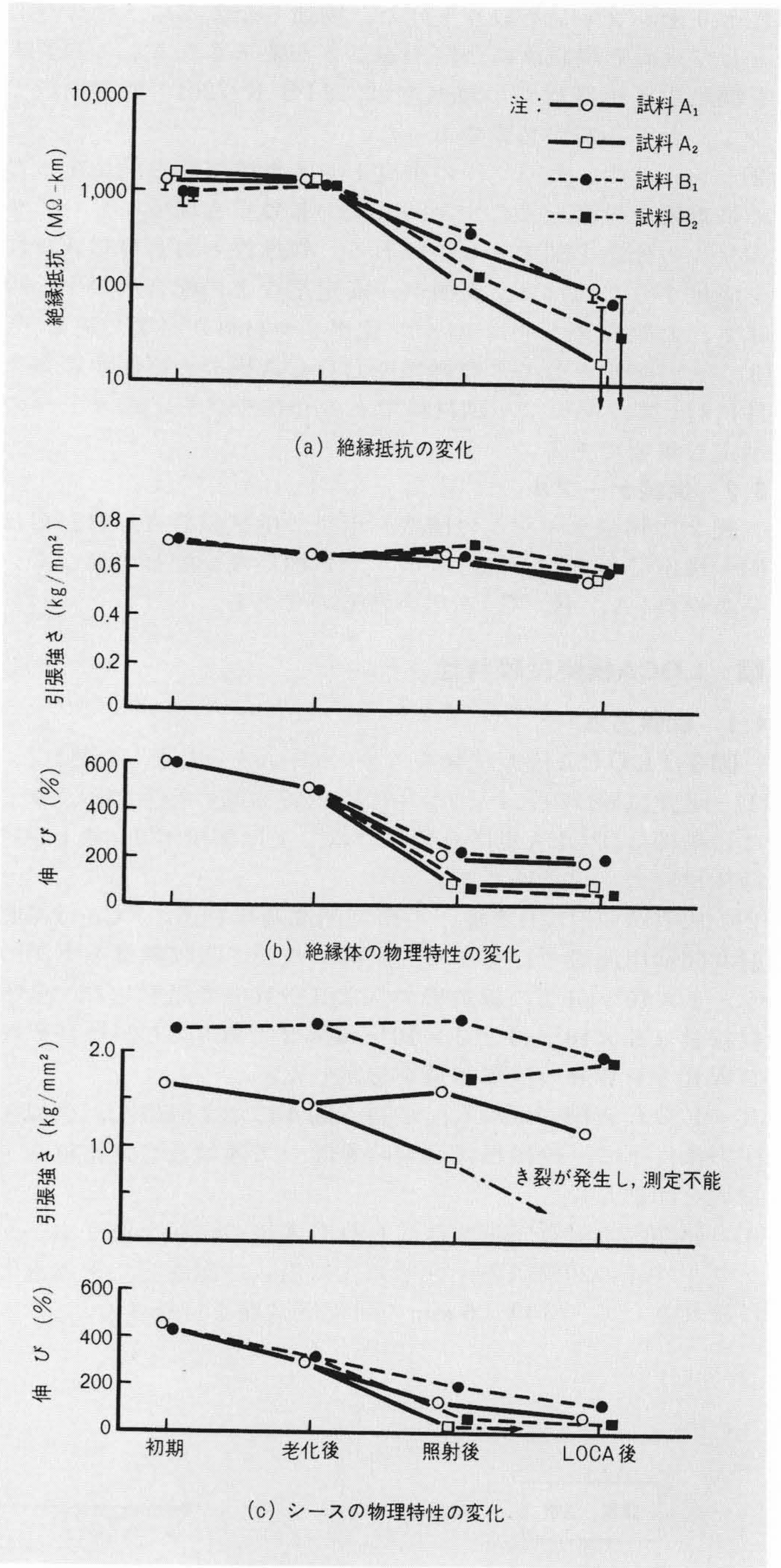



図6　絶縁抵抗及び材料の物理特性の変化(試料A及びB)　試料A及びBについて，照射レベルの差が明らかに表われている。

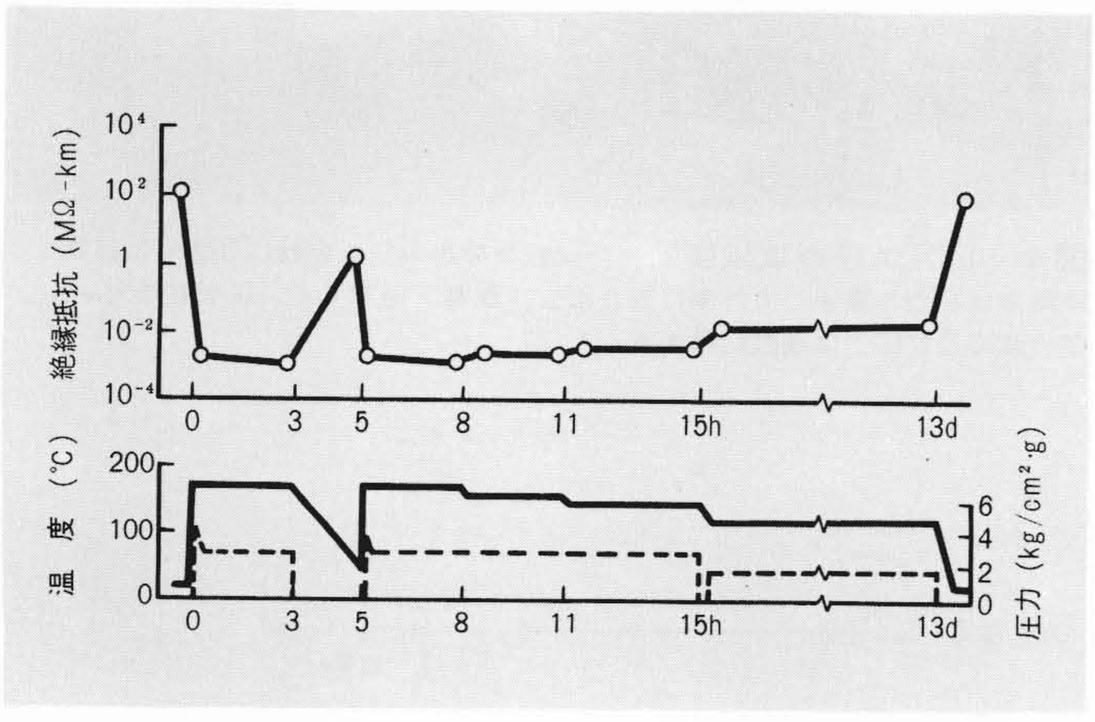



図5　LOCA模擬試験中の絶縁抵抗　試料$C_2$について絶縁抵抗測定結果を示す。超絶縁計を用いて500V I 分値で測定した。高温有効長は3.05mである。

表3　LOCA模擬試験結果　2×10⁸radの照射を経過した場合に，シース材料による差が明らかとなった。試料Cが良好な結果を示した。

| ケーブル試料 | 試験経過 | | 結果 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 老化 | 照射 | LOCA模擬中の課電，通電 | 屈曲浸水耐電圧 (3kV/5min) | 外観特記事項 |
| $A_1$ | 121±1℃×7d | 5×10⁷rad | 480V，23A 良 | 良 | 屈曲後，シース表面に微小なひび割れが発生した。 |
| $A_2$ | 〃 | 2×10⁸rad | 〃 | 不良 | LOCA模擬中にシースを貫通するき裂が激しく発生した。 |
| $B_1$ | 〃 | 5×10⁷rad | 〃 | 良 | 異常なし |
| $B_2$ | 〃 | 2×10⁸rad | 〃 | 不良 | LOCA模擬中にシースを貫通するき裂が1個所発生した。 |
| $C_1$ | 〃 | 5×10⁷rad | 〃 | 良 | 異常なし |
| $C_2$ | 〃 | 2×10⁸rad | 〃 | 〃 | 屈曲後，シース表面に微小なひび割れが発生した。 |
| $C_3$ | なし | 5×10⁷rad | 〃 | 〃 | 異常なし |
| $C_4$ | 〃 | 2×10⁸rad | 〃 | 〃 | 屈曲後，シース表面に微小なひび割れが発生した。 |

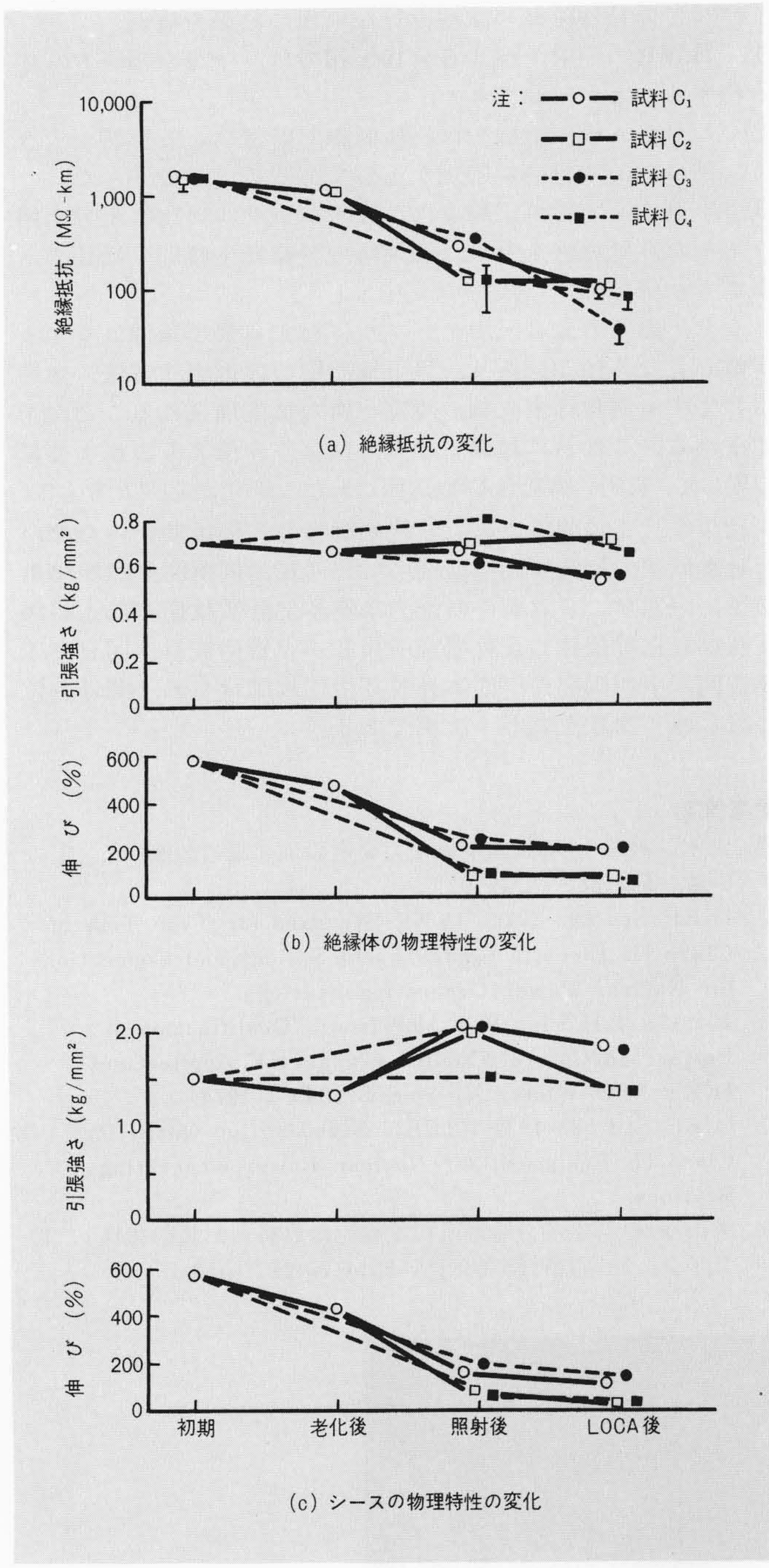



図 7　絶縁抵抗及び材料の物理特性の変化(試料C)　試料Cについて老化の有無の影響を比較した。

料は**図 8** に示すように，垂直な金属製ラダー トレイ(幅305 mm，深さ76mm，高さ2,440mm)にケーブル外径の1.5倍のピッチで取り付け，トレイの幅の少なくとも半分以上を埋めるように試料を並べる。火源にはリボンタイプ ガスバーナ(American Gas Furnace Co. No. 10×11-55)を用い，燃料にはプロパン ガスを使用した。またプロパン ガスと空気の混合比は，**図 8** のミキサの入口側水柱圧をそれぞれ−26± 3 mm，43± 5 mmとした。このときの燃焼温度は約815℃で，発生熱量は約20,000kcal/h(約80,000BTU/h)である。試験中，バーナは20分間連続して燃やし続け，炎の温度とバーナからの高さを記録し，合わせて参考のためにケーブルの線心間及び大地間に交流480Vを課電して，絶縁破壊するまでの時間を測定した。バーナ停止後，トレイの高さ全長まで延焼しないで自己消炎するケーブルを合格とし，絶縁体及びシースの損傷距離を測定した。

### 5.2　試験結果

**表 4** に燃焼試験結果の概要を示す。従来品に比べ十分な余裕をもつ難燃性が得られた。また短絡発生時間も従来品の 1 ～

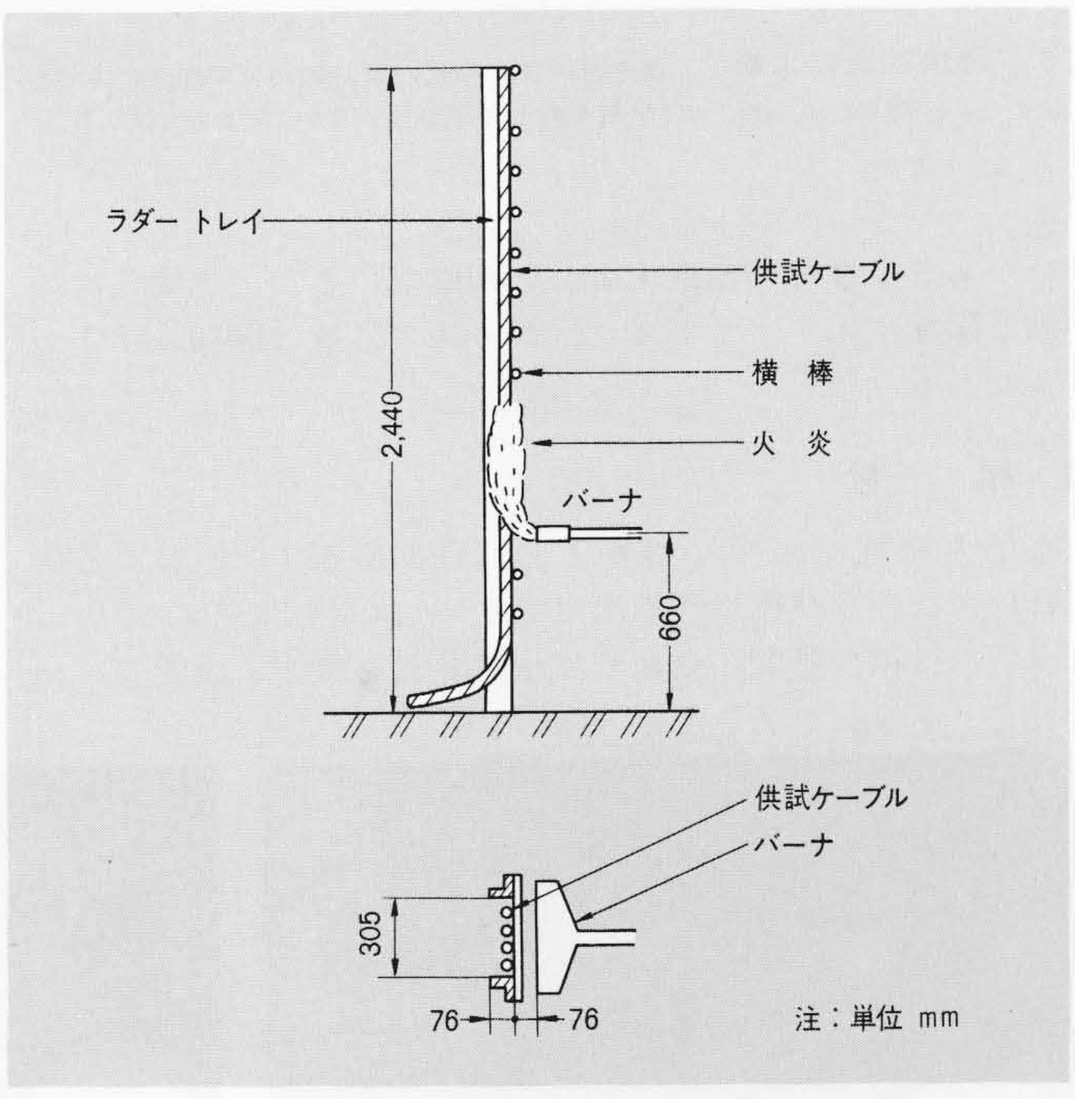



図 8　垂直トレイ燃焼試験の概要　バーナの高さで，試料から約 3 mm 離れた点の温度を約815℃とするように火源を調節する。

表 4　燃焼試験結果の概要　垂直燃焼試験はIPCEA規格による。ビニル線心は合格するが，垂直トレイ燃焼試験では不合格となる。

| ケーブル試料 | | | 垂直トレイ燃焼試験 | | | | | 垂直燃焼試験 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 分類 | 品名 | サイズ | 短絡発生時間 ((min, s) | 焼損距離(mm) 絶縁体 | 焼損距離(mm) シース | 燃焼継続時間 (min, s) | 判定 | 判定 |
| 供試試料 | A | 7×3.5mm² | 5′36″～6′20″ | 610 | 680 | 0′00″ | 合格 | 合格 |
| | B | 〃 | 7′10″～9′19″ | 550 | 620 | 〃 | 〃 | 〃 |
| | C | 〃 | 7′01″～7′42″ | 620 | 810 | 〃 | 〃 | 〃 |
| 従来品 | CEV | 〃 | 2′04″～2′12″ | 全長(1,800) | 全長(1,800) | —— | 不合格 | 不合格 |
| | CVV | 3×2 mm² | 1′51″～2′26″ | 〃 | 〃 | —— | 〃 | 合格 |
| | CEE | 〃 | 1′45″～1′57″ | 〃 | 〃 | —— | 〃 | 不合格 |
| | CCV | 〃 | 2′33″～3′33″ | 〃 | 〃 | —— | 〃 | 〃 |

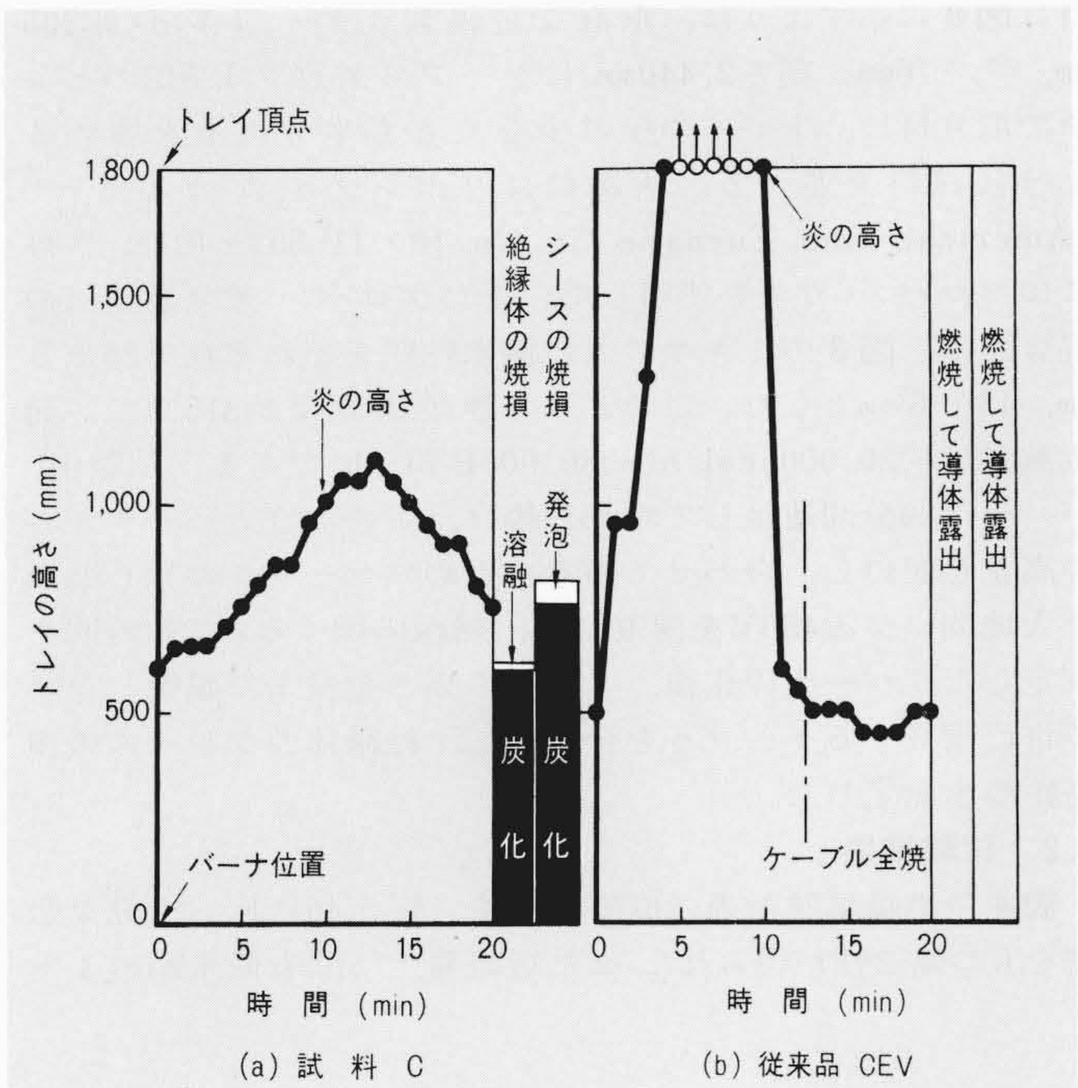



図9 燃焼状況の比較 従来ケーブル(CEV)は，約10分で完全に焼却してしまうが，試料Cは，約1mの余裕を残して延焼性がないことを示している。

3分から5～9分に延長することが確認できた。燃焼状況の一例は**図9**に示すようであり，20分後の外観は**図10**に示すとおりである。

## 6 結 言

原子力発電所用ケーブルとしてIEEE-383の要求する耐LOCA特性及び難燃性を満足するケーブルを開発するため，ケーブル材料の研究と合わせて試験装置を新しく設置し，ケーブルでの特性確認の試験を行ない次の結果を得た。

(1) BWRの照射レベル$5\times10^7$radでは，十分余裕をもって合格することが確認できた。

(2) LOCA模擬試験では，放射線照射量による影響が大きく，特にシース材料の選定が重要であることが分かった。

(3) 垂直トレイ燃焼試験では，在来ケーブルに比べ十分余裕をもった非延焼性をもち，燃焼時の短絡発生時間も延長できることが確認できた。

なお，原子力発電所用ケーブルに対する要求条件はますます厳しくなる傾向にあり，目下検討中の促進老化方法，燃焼時発生する腐食性生成物の規定が新たに追加されることが予想される。これらに対処するためには，今後ともこれまでにも増して，材料，構造及び製造面にわたる研究が必要と考える。

最後に，この開発に当たり終始御指導，御援助をいただいた日本原子力研究所高崎研究所柴田所長，同所開発試験場重松場長，並びに日立製作所電力事業本部計装技術本部太組部長及び日立電線株式会社研究所川和田主管研究員，同日高工場吉岡，中西両部長，同本社笠井主任技師はじめ，関係各位に対し厚く謝意を表わす次第である。

## 参考文献

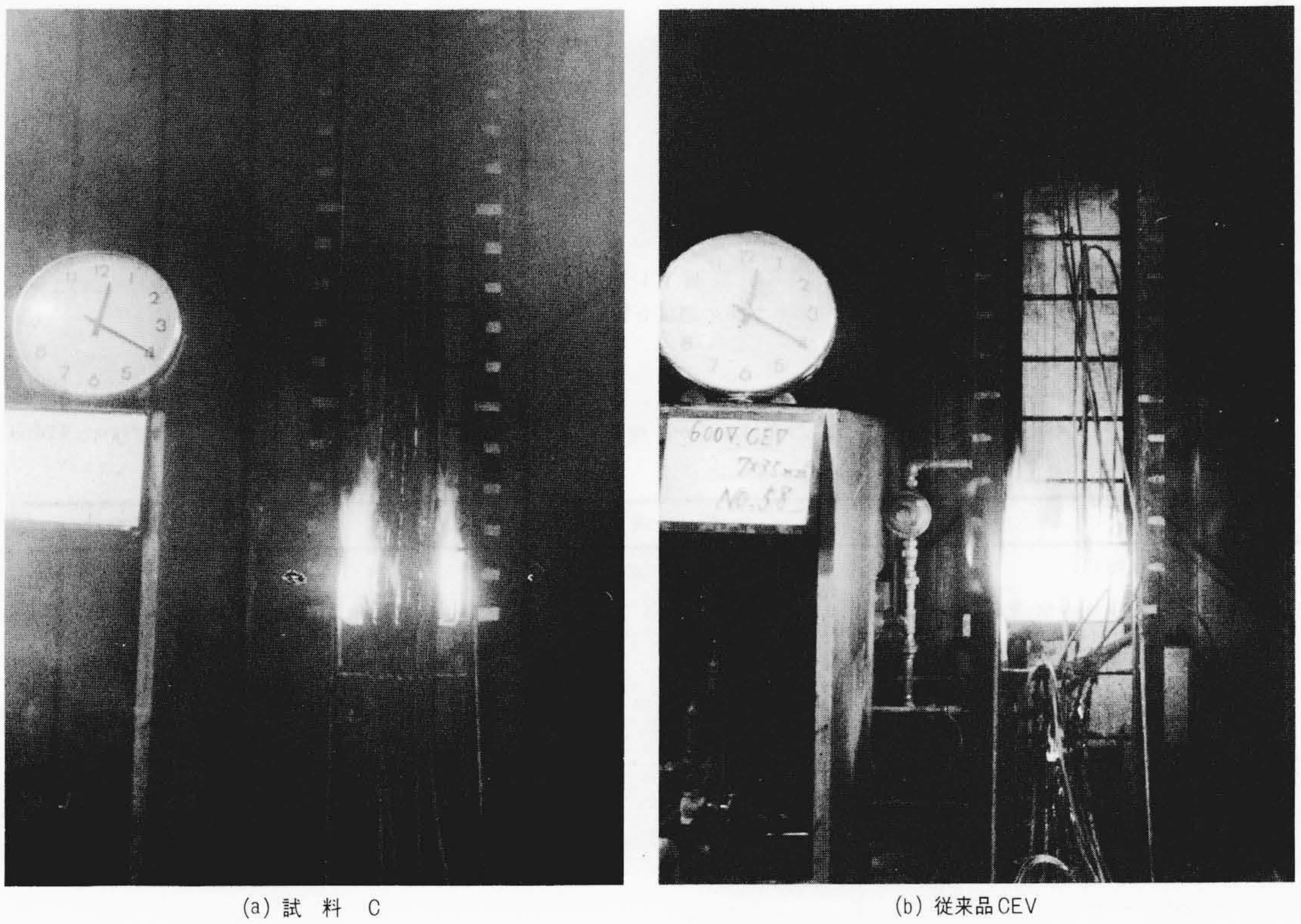
(1) 大木，浜田：「沸騰水型原子力発電設備の最近の動向」，日立評論 **56**，882（昭49-9）

(2) IEEE Std 383-1974 "IEEE Standard for Type Test of Class IE Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Power Generating Stations."

(3) 例えば，T.H. Ling, W.F. Morrison："Qualification of Power and Control Cable for Class IE Applications" IEEE PES Winter Meeting, C74045-1(1974)など。

(4) IEEE Std 323-1974："IEEE Standard for Qualifying Class IE Equipment for Nuclear Power Generating Stations."

(5) 栗山ほか：「原子力発電所用電線絶縁材料の耐放射線性」 電気学会，絶縁材料研究会資料EIM-75-21（昭50-7）




(a) 試 料 C　　(b) 従来品CEV

図10 燃焼試験終了時の外観 垂直トレイで20分燃焼時の外観を示している。従来ケーブル(CEV)では導体だけとなっているが，試料Cでは生き残っている。