

設工認その 10 に係る難燃シートを用いたケーブル分離について

令和 2 年 8 月 28 日

日本原子力研究開発機構

原子力科学研究所

【R2. 4. 20 審査会合コメント】

- ・実証試験の結果を踏まえたケーブル分離の妥当性を説明すること。

1. 難燃シートを用いたケーブル分離に係る経緯について

JRR-3 は、炉心を火災の影響により損傷させないために、原子炉の運転中において火災を確認した場合は、原子炉を停止し、その後、30 秒間の強制冷却（1 次冷却材主ポンプ 2 台、1 次冷却材補助ポンプ 2 台の計 4 台あるポンプのうち少なくとも 1 台による冷却確保）をすることとしている。この考え方のもと、火災の発生により施設の安全性が損なわれることを防止するため、火災発生防止（電気系統の過熱・焼損の防止、発火性・引火性物質の管理）、火災検知及び消火（自動火災報知設備、消火設備の設置）並びに火災の影響の低減（区画・距離・バリアによる物理的分離、多重化、フェールセーフ設計、不燃又は難燃性ケーブルの使用）の三方策を適切に組み合わせて、内部火災に対する防護対象設備を防護することを基本方針としている。

原子炉建家貫通部周辺の安全保護系ケーブル（対象となる計測制御系ケーブルは、建家貫通部においては安全保護系ケーブルを共用している）及び 1 次冷却材補助ポンプの運転に必要な非常用電源系ケーブル（以下、「防護対象ケーブル」という。）についてはケーブルトレイ等による物理的な分離がなされておらず（図 1. 1 参照）、また周囲には防護対象以外の一般系ケーブルが敷設されているため、万が一、原子炉建家貫通部周辺で防護対象ケーブルまたは一般系のケーブルによる火災が発生した場合には、この火災により 2 系統のケーブルが同時に機能喪失し、原子炉停止後 30 秒の強制冷却が維持できない可能性がある。このため、令和 2 年 4 月 20 日の審査会合において、これらの物理的分離がされていない防護対象ケーブルについて、難燃シートを巻設することで物理的分離を行い、火災発生時にも少なくともどちらか一方の系統の機能を防護することで原子炉停止後 30 秒の強制冷却を確保すること、また、施工に先立って、難燃シート巻設にあたっては、難燃シートの性能に係る実証試験を実施し、巻設する難燃シートがケーブルの物理的分離に十分な性能を有していることを確認する旨説明をおこなった。

本資料は、難燃シートの性能に係る実証試験の結果を踏まえたケーブル分離の妥当性について説明するものである。

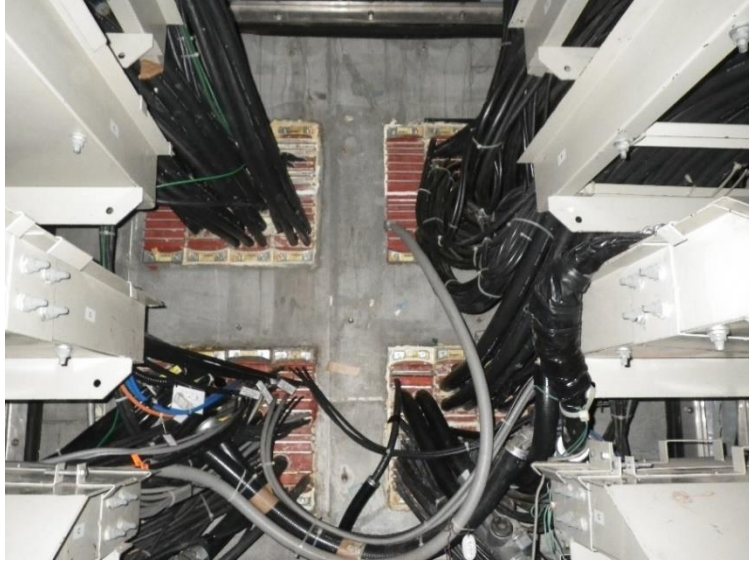


图 1. 1 原子炉建家貫通部周辺

2. JRR-3における火災影響評価について

ケーブル火災による影響評価にあたっては、原子炉建家貫通部周辺において火災が継続する時間を把握するために、内部火災評価ガイドを参考に原子炉建家貫通部周辺における火災等価時間を算出する。評価対象の区画については、保守的な評価を行うため、火災区画面積が原子炉建家地階に比べて小さくなるケーブルダクト室とする。

2.1 評価条件

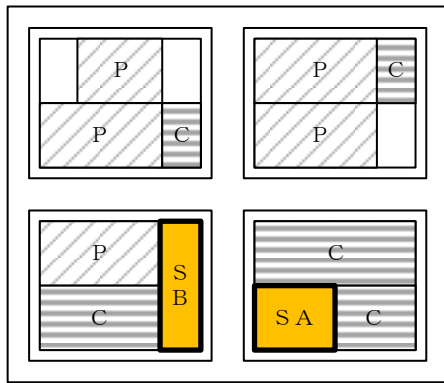
(1) ケーブルの種類、配置の詳細

原子炉建家貫通部周辺に敷設されているケーブルの種類は、動力ケーブル（動力、電灯、制御）、信号ケーブル（計装、特殊、その他）である。これらのケーブルは一部を除いて難燃性を有するケーブルを採用している（動力、電灯、制御、計装、特殊ケーブル等、原子炉設置時に敷設したケーブルはすべて難燃ケーブル。後付けしたその他のケーブル（LAN ケーブル等）は一部非難燃性）。ケーブル詳細配置図を図2.1に、貫通部ケーブル一覧表を表2.1に示す。

また、原子炉運転中においてケーブルダクト室は立入禁止とし施錠管理をしていることから、可燃物のケーブル以外の発火源が持ち込まれることはない。このことから、ケーブルを発火源としたケーブル火災について評価する。

(2) 発火源及び可燃物の想定

- ・ ケーブルダクト室には可燃物は存在せず、これらは施設内への持込管理を行うことから、発火源としてはケーブルのみを想定する。
- ・ 可燃物は、ケーブルダクト室原子炉建家貫通部のすべてのケーブルを対象とする。



← 防護対象ケーブル

貫通部の区分

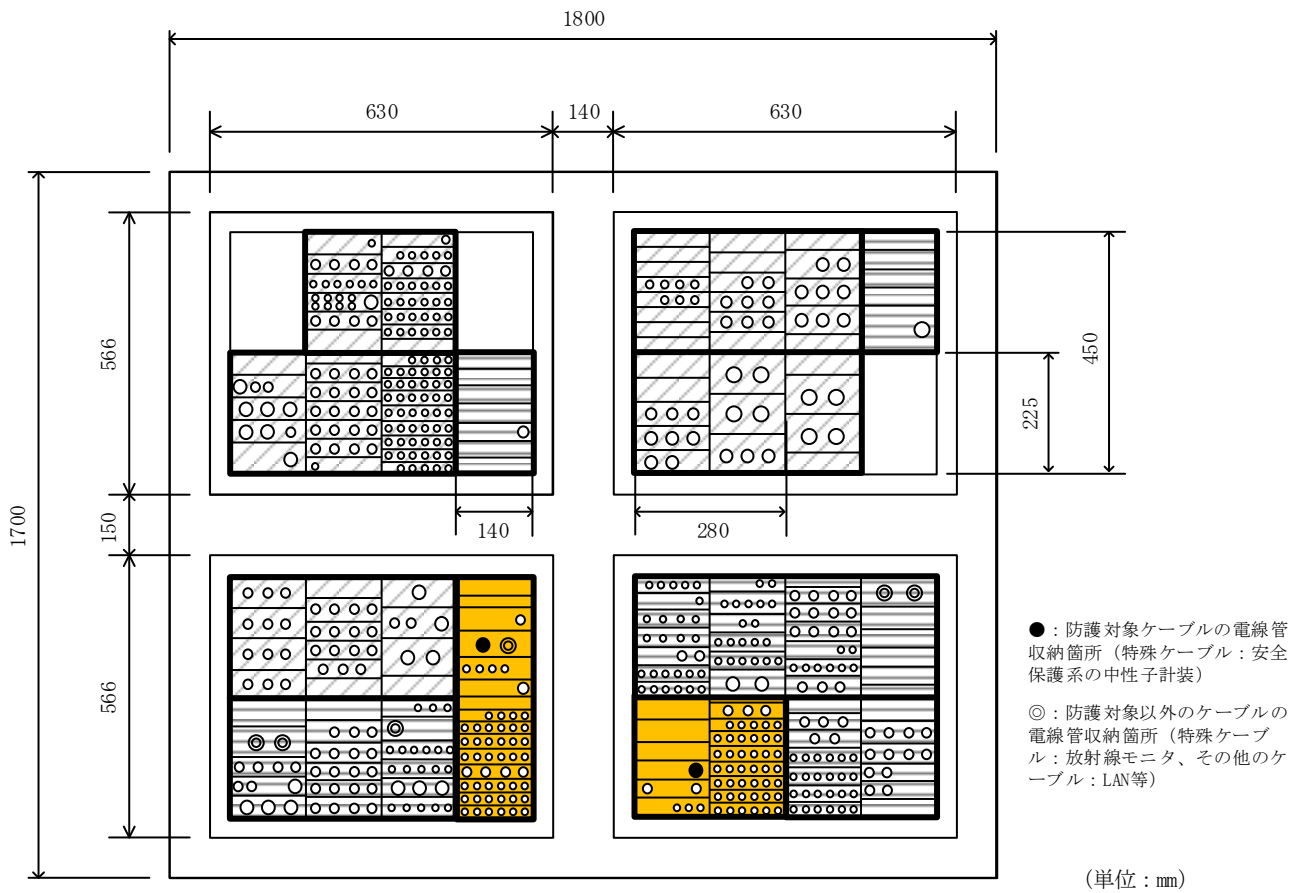


図 2.1 貫通部のケーブル詳細配置図 (原子炉建家側視点)

表 2.1 貫通部ケーブル一覧表

種類		ケーブル名称	難燃性の確認	
			延焼性	自己消火性
動力ケーブル	動力、電灯 ケーブル (P、SA、SB)	難燃 EP ゴム絶縁特殊クロロブレン ゴムシースケーブル	○	○
		難燃性架橋ポリエチレン絶縁ビニ ルシース低圧動力ケーブル	○	○
	制御ケーブル (P、SA、SB)	制御用難燃 EP ゴム絶縁特殊クロロ ブレンゴムシースケーブル	○	○
		難燃性ビニル絶縁ビニルシース制 御ケーブル	○	○
信号ケーブル	計装ケーブル (C、SA、SB)	静電遮蔽付難燃 EP ゴム絶縁特殊ク ロロブレンゴムシースケーブル	○	○
		難燃性ビニル絶縁ビニルシース計 装ケーブル	○	○
	特殊ケーブル (C、SA、SB)	架橋ポリエチレン絶縁 2 重編組特 殊同軸ケーブル	○*	○
	その他 (C)	難燃性ビニル絶縁電線	○	○
		LAN ケーブル	○	
		光ファイバーケーブル		
		原子炉建家地震計専用ケーブル		

*鋼製可とう電線管に収納して敷設することにより延焼に対して防護している。

2.2 評価

(1) 火災区画の面積

発火源に想定したケーブルが設置されているケーブルダクト室の床面積を火災区画の面積に設定する。

$$\text{ケーブルダクト室の床面積} = 2.9\text{m (幅)} \times 25.8\text{m (奥行総延長)} = 74.82 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$\therefore \text{火災区画の面積} : 74.82 \text{ (m}^2\text{)}$$

(2) 火災区画の発熱量

難燃シート施工範囲のケーブルを発火源とし、この範囲のケーブルの量から発熱量を算出する。

可燃性物質の量 (ケーブル量) : 575 (kg)

ケーブルの熱含有率 : 25,568 (kJ/kg)

発熱量 = ケーブル量 × 熱含有量

$$= 575 \times 25,568$$

$$= 14,701,600 \text{ (kJ)}$$

(3) 等価時間の設定

(2) で算出した火災区域の発熱量から、下式により等価時間を算出する。

$$\begin{aligned} \text{等価時間} &= \text{火災荷重} / \text{燃焼率} \\ &= \text{発熱量} / \text{火災区画の面積} / \text{燃焼率} \\ &= 14,701,600 / 74.82 / 908,095 \\ &= 0.22 \text{ (h)} \\ &= 13.2 \text{ (min)} \end{aligned}$$

ここで、

燃焼率：短時間単位面積当たりの発熱量 (908,095 kJ/m²/h)

発熱量：14,701,600 (kJ)

火災区画の面積：74.82 (m²)

以上より、JRR-3 の建家貫通部周辺における火災等価時間は 13.2 分である。

3. 原子炉建家貫通部のケーブル分離について

3.1 原子炉建家貫通部のケーブル分離の設計方針

防護対象ケーブルの大部分については、各系統、ケーブルの種類ごとに分離してケーブルダクト、ケーブルトレイ又は電線管に設置する等、火災に対する防護対策がされているが、原子炉建家の貫通部については、構造上の制約からケーブルトレイから外れ、比較的近い距離に集まり建家を貫通するため、火災に対する物理的な独立性が確保されていない。そのため、当該箇所については防護対象ケーブルA系、B系をそれぞれ鋼板で囲い、その外側に難燃シートを施工し、系統分離することにより独立性を確保する。これにより、原子炉停止後 30 秒間の強制冷却を確保する。

なお、原子炉建家内側の貫通部のうち、原子炉建家壁により物理的に分離されている箇所については、厚さ 140 mm の鉄筋コンクリートで分離が図られており（図 3. 1 参照）、どちらか一方の貫通部よりケーブル火災が発生した場合にも原子炉停止後 30 秒の強制冷却が確保できることから、難燃シート等の施工による分離は不要とする。また、貫通部の MCT は耐火構造を有しており、火災が貫通部を通過することはない。

3.2 難燃シートの施工方法

3.2.1 難燃シートの設計仕様

防護対象ケーブルに施工する難燃シート等の仕様を表 3. 1 に示す。

表 3. 1 難燃シート等の設計仕様

項目		仕様
難燃シート (シリカ・マグネシア・カルシア系 ＋シリカ系複合材)	断熱材 (厚さ)	ファイナフレックス BIO ブランケット (厚さ 50mm)
	表皮材 (厚さ)	コーテッドシリカクロス (厚さ 0.6mm)
	内皮材 (厚さ)	ガラスクロス (厚さ 0.36mm)
鋼板	材質	亜鉛メッキ鋼板 (SECC)
	厚さ	1.6mm

3.2.2 施工方法

難燃シート等は当該設備の性能を損なわないよう、下記に従ったうえで図 3. 2 及び図 3. 3 に示すように施工する。

- (1) 難燃シート及び鋼板は、表 3. 1 に示す仕様のものを用いる。
- (2) 防護対象ケーブル A 系、B 系の各々を鋼板で囲い、その外側を難燃シートで巻設する。
- (3) 難燃シートの固定には、耐熱性を有する止め具（表皮材と同様の材質のベルト等）を用いる。
- (4) 以下に示す難燃シートの設置範囲の境界部分については、UL94V-0 相当以上の難燃性を有するパテ等を用いて隙間を埋めることとする。

- ・原子炉建家内側：建家貫通部（壁面手前まで）のケーブルと難燃シートの境界及び既設ケーブルトレイと難燃シートの境界
- ・原子炉建家外側：建家貫通部（壁面）のケーブルと難燃シートの境界及び既設ケーブルトレイと難燃シートの境界

厚さ 140mmの原子炉建家壁で分離されていることから、一方の貫通部でケーブル火災が発生した場合にも原子炉停止後 30 秒の強制冷却の確保が可能。

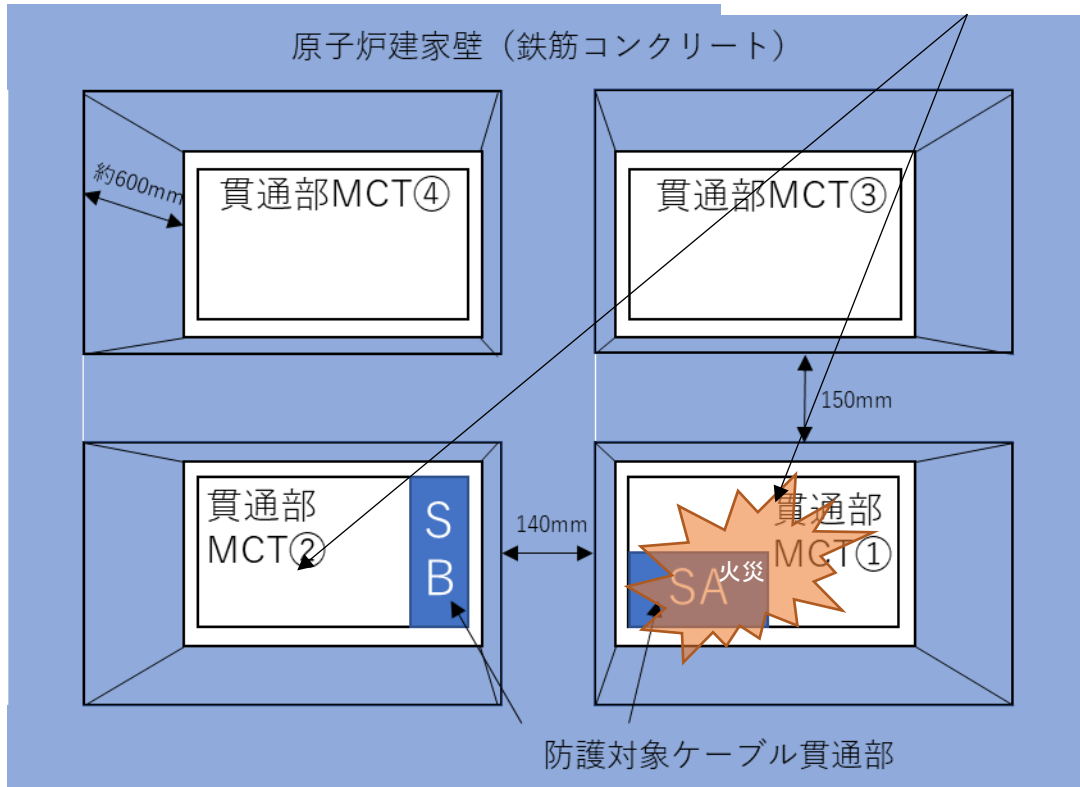


図 3. 1 原子炉建家貫通部イメージ図（原子炉建家側）

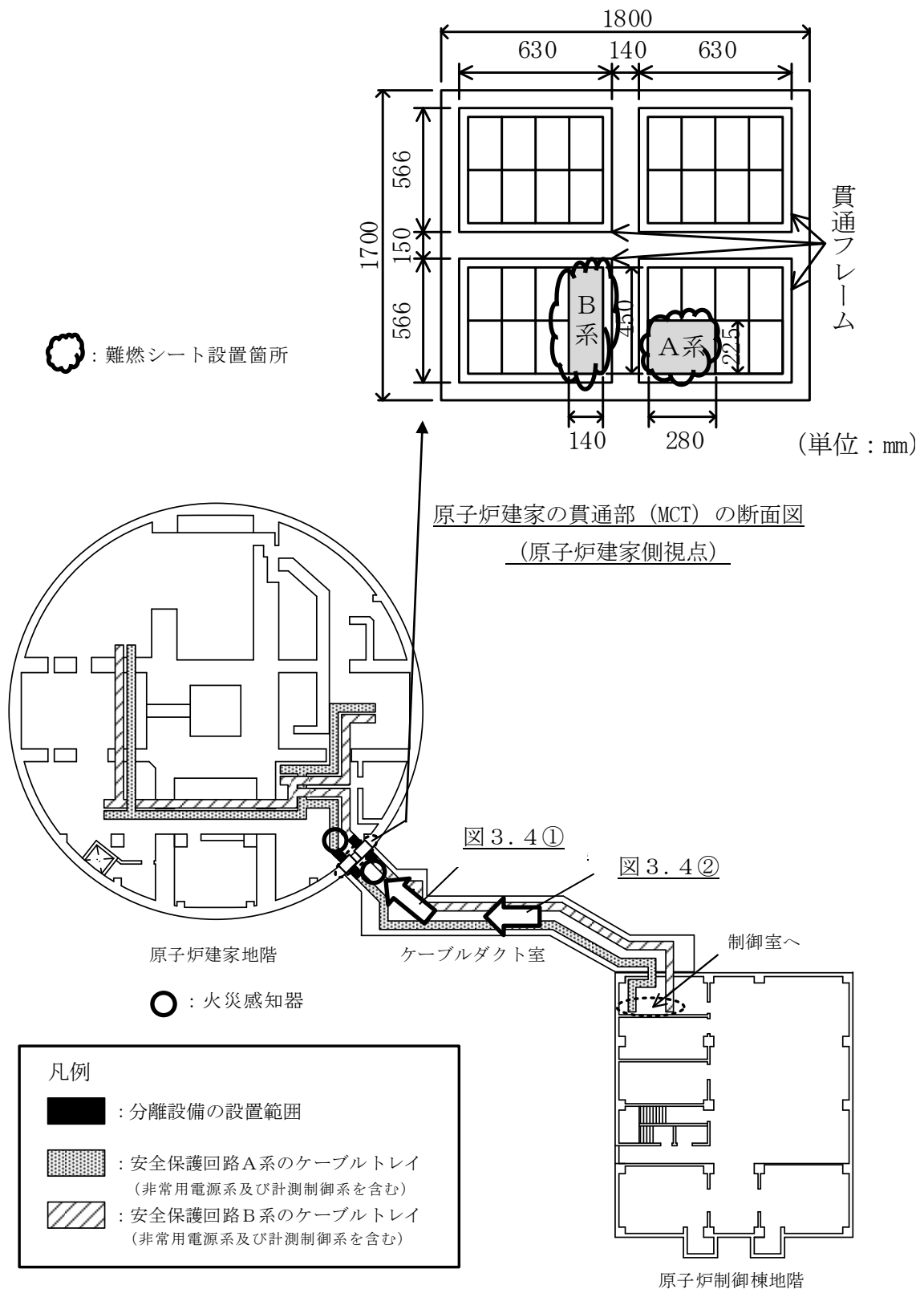


図 3.2 分離設備の設置図

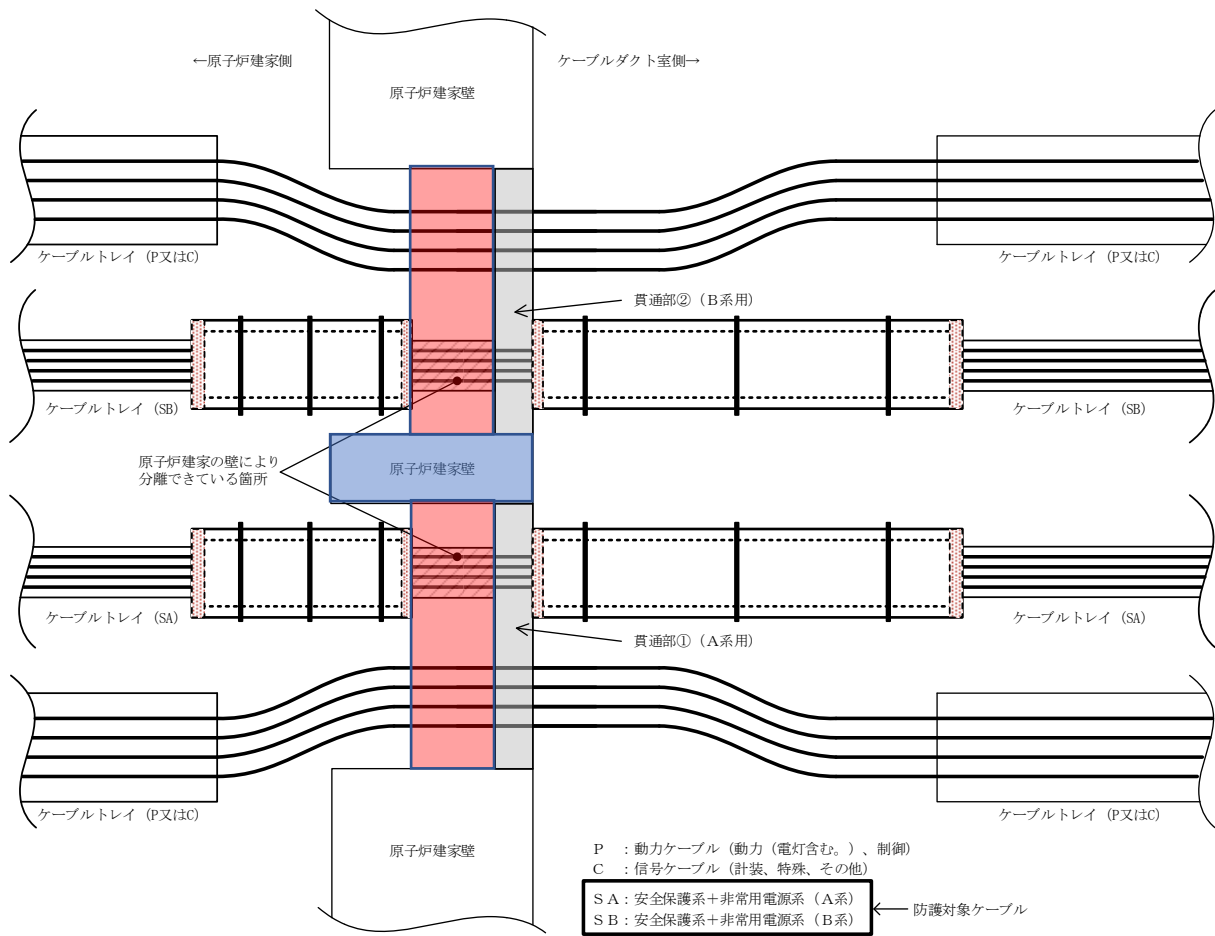


図 3. 3 難燃シート等の施工概略図



図 3. 4 ① ケーブルダクト室内 MCT 付近



図 3. 4 ② ケーブルダクト室内

4. 難燃シートの実証試験について

原子炉建家貫通部の防護対象ではない一般系のケーブルが発火源となる火災発生を想定した場合に、防護対象ケーブルの機能喪失を防止するための分離設備として施工する難燃シートについて、ISO834 の標準加熱曲線で1時間加熱したときの非加熱面側の温度を確認するため、試験体を用いた実証試験を行った。以下に具体的な試験内容、試験結果等を示す。

4.1 試験内容

4.1.1 試験体の仕様

実証試験に用いる試験体は、以下の機器等を組み合わせて構成する。図4.1に試験体の概略図を示す。

(1) 難燃シート（以下①～③の複合材）

①断熱材

- ・名称：ファインフレックス BIO ブランケット
- ・製造社：ニチアス
- ・型式番号：5615
- ・品種：160kg/m³ (#160)
- ・厚さ：50mm

②表皮材（外側）

- ・名称：コーテッドシリカクロス
- ・製造社：株式会社日本無機
- ・型式番号：BCS/NZ
- ・厚さ：0.6mm
- ・耐熱温度：1000℃

③内皮材（内側）

- ・名称：ガラスクロス
- ・製造社：ユニチカ
- ・厚さ：0.36mm
- ・使用温度：300～500℃

(2) ケーブルトレイ模擬体

- ・材質：亜鉛メッキ鋼板（SECC）
- ・外径寸法：280mm(W) × 1500mm(L) × 226.6mm(H)
- ・鋼板厚さ：1.6mm
- ・形状：全面密封形

(3) 難燃性ケーブル

- ・名称：架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース電力ケーブル
- ・製造社：住電日立ケーブル株式会社
- ・型式番号：600V F-CV 3C×22sq
- ・断面積：22mm²

- ・心数：3心
- (4) 温度センサ
- ・使用熱電対：K熱電対（JIS C 1602に規定するクラス2を満たすもの）
 - ・仕様：ガラス被覆熱電対、素線構成（1/0.65×1P）
 - ・長さ：4m

4.1.2 試験方法

試験は、建築基準法に基づく標準加熱曲線（IS0834 曲線、表4.1及び図4.2参照）を用いて実施するものとする。鋼板のケーブルトレイ模擬体内に温度センサ及び難燃性ケーブルを固定し、ケーブルトレイ模擬体の外側全面に難燃シートを巻設した試験体を準備し、加熱試験炉にて加熱試験を行う。

(1) 加熱条件

標準加熱曲線（IS0834 曲線）に基づき、加熱開始から1時間経過後の温度が945℃となるように試験体の片面を加熱する。

(2) 試験ケース

JRR-3の試験は、難燃シート（断熱材）の厚さを変えた以下の2つのケースにて実施する。

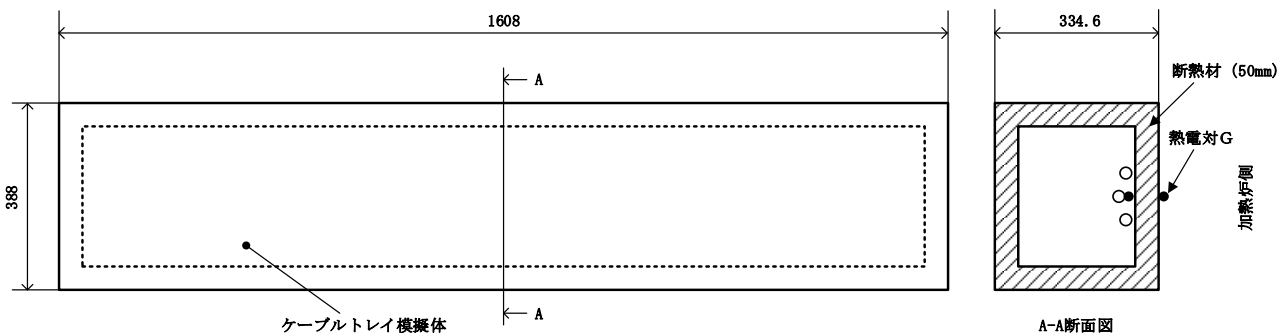
- ・ケース1 難燃シート（断熱材）の厚さ：50mm
- ・ケース2 難燃シート（断熱材）の厚さ：40mm（元厚さ50mm→40mmに圧縮したもの）※

※参考として断熱材を圧縮した場合の影響について実証試験により確認する。

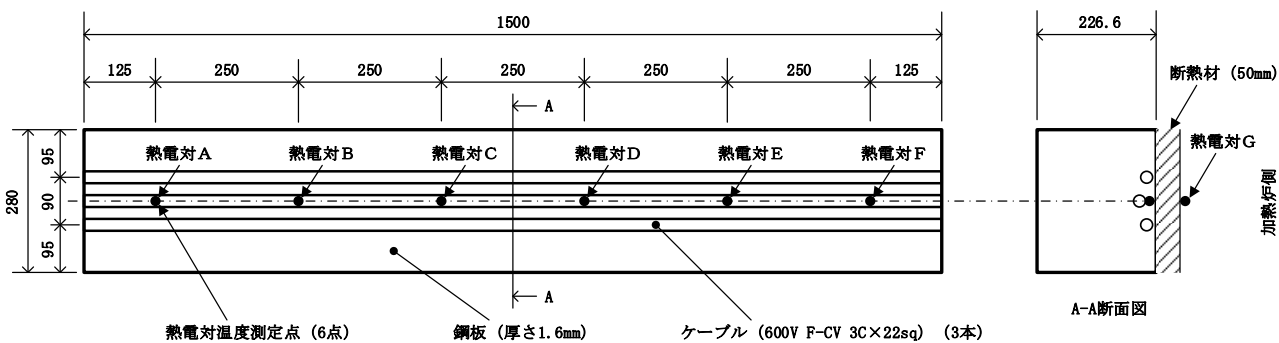
(3) 判定基準

試験体内部温度（非加熱面温度）が機能喪失温度（ケーブル損傷基準：205℃）以下であること。

・試験体の主要寸法



・熱電対の配置



(単位：mm)

・試験体の断面（詳細）

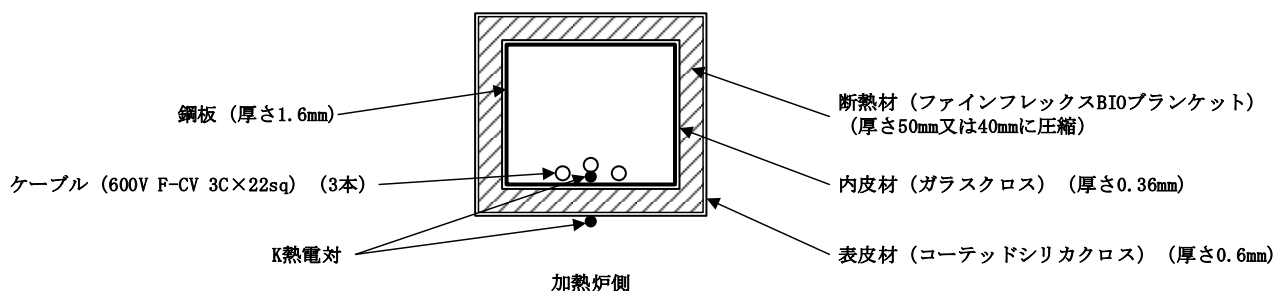


図 4. 1 試験体の概略図

表 4.1 標準加熱試驗溫度表

時間：t (分)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
標準加熱曲線 (°C)	576	678	739	781	815	842	865	885	902	918	932	945

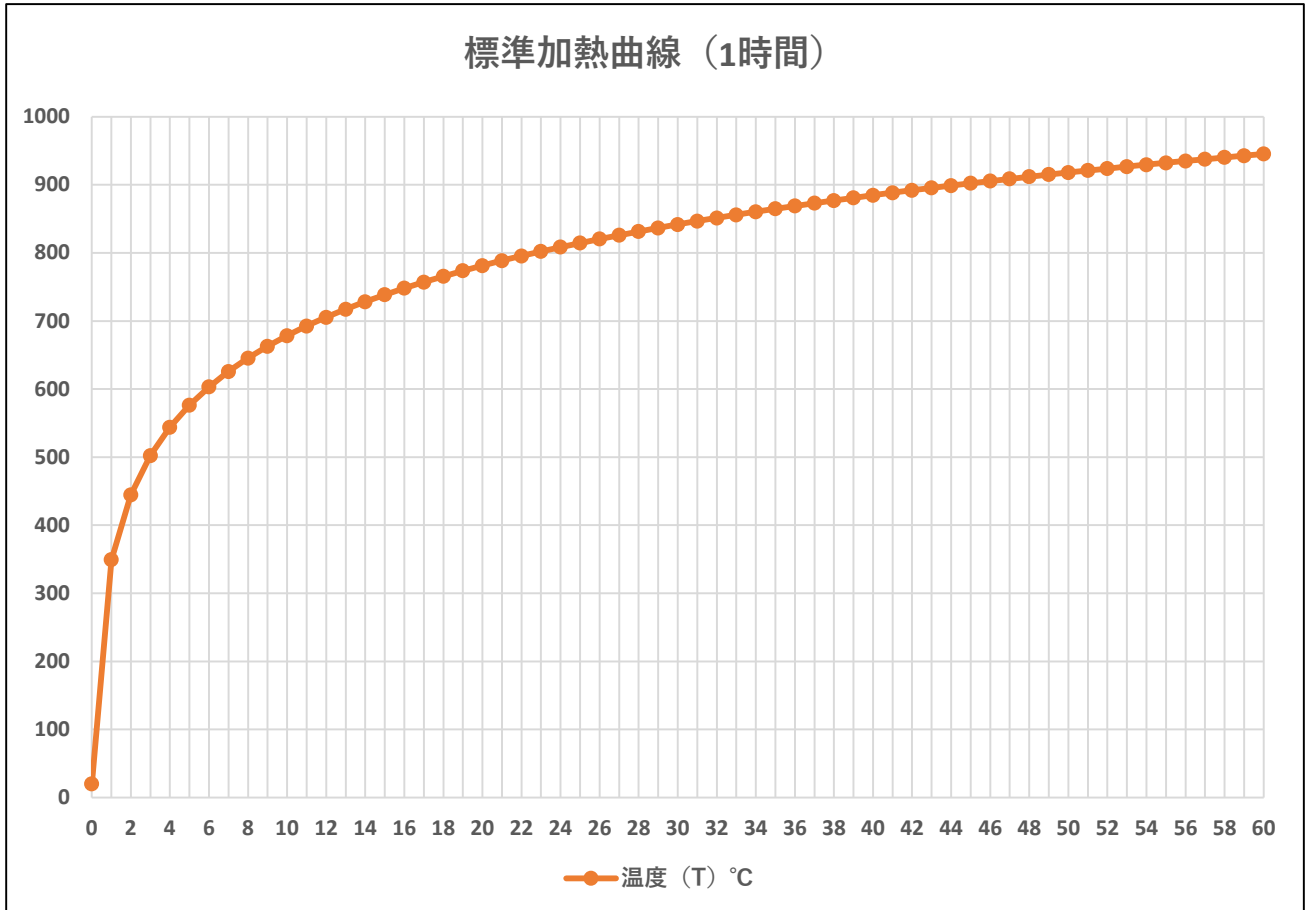


図 4.2 標準加熱曲線図

IS0834 標準加熱曲線式 $T = 345 \log_{10} (8t+1) + 20$

T : 加熱溫度 (°C)

t : 時間 (分)

引用元 INTERNATIONAL STANDARD IS0834-1 First edition 1999-09-15

Fire-resistance tests Elements of building construction Part1 General requirements

4.2 実証試験結果

ケース1及びケース2の実証試験結果を表4.2、表4.3、図4.3及び図4.4に示す。

表4.2 ケース1実証試験結果 (難燃シート(断熱材)の厚さ:50mm)

経過時間 (分)	標準加熱試験 温度 (°C)	炉内温度 (°C)	試験体内部温度 (°C)					
			測定点 A	測定点 B	測定点 C	測定点 D	測定点 E	測定点 F
0	50°C以下	30.9	27.6	27.6	27.7	27.7	27.8	27.8
5	576	586.5	32.1	32.2	31.9	31.5	30.7	30.9
10	678	669.8	34.7	35.3	34.7	34.4	33.6	33.4
15	739	743.9	37.4	37.9	37.1	36.4	35.6	35.2
20	781	798.9	43.1	43.8	42.5	41.2	38.9	38.2
25	815	822.3	51.8	53.3	51.5	49.5	45.6	44.0
30	842	847.6	61.3	63.9	61.0	58.9	54.2	51.4
35	865	873.9	72.5	76.7	74.1	71.1	64.0	59.5
40	885	891.9	84.3	90.4	88.3	84.6	76.0	69.3
45	902	910.6	96.2	104.4	102.7	98.0	88.7	80.1
50	918	925.5	108.1	118.0	116.8	110.9	101.4	91.2
55	932	940.9	119.8	131.4	130.5	123.9	113.9	102.6
60	945	952.7	132.2	145.1	144.3	137.2	127.1	114.8

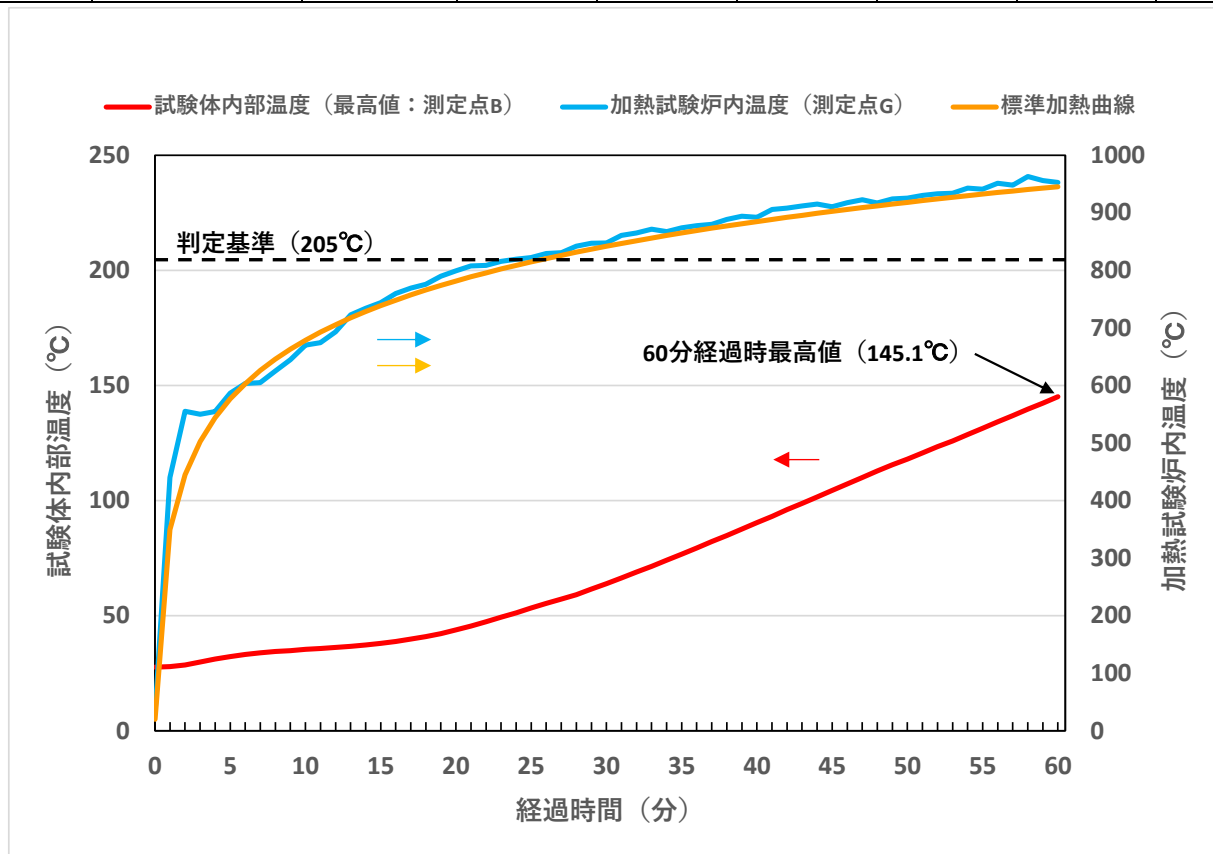


図4.3 ケース1実証試験結果

表 4.3 ケース 2 実証試験結果 (難燃シート (断熱材) の厚さ: 40mm 圧縮)

経過時間 (分)	標準加熱試験 温度 (°C)	炉内温度 (°C)	試験体内部温度 (°C)					
			測定点 A	測定点 B	測定点 C	測定点 D	測定点 E	測定点 F
0	50°C以下	29.2	27.9	27.7	28.6	27.7	28.7	28.8
5	576	621.5	32.0	32.5	32.7	32.2	33.8	33.2
10	678	710.7	39.0	39.3	40.3	39.1	40.4	39.4
15	739	756.5	47.5	47.8	48.9	46.9	49.3	47.6
20	781	805.7	59.2	59.6	59.8	57.6	61.8	59.0
25	815	839.4	75.0	78.2	75.8	72.3	80.2	72.8
30	842	870.7	96.3	99.9	97.3	94.5	104.3	95.4
35	865	891.5	116.4	120.9	118.0	115.7	127.2	116.2
40	885	900.7	136.1	141.6	138.1	136.3	148.4	135.9
45	902	916.9	155.4	161.1	156.8	156.4	166.8	155.0
50	918	945.5	173.2	178.4	172.8	174.8	185.2	173.0
55	932	969.4	191.0	195.3	191.8	194.6	199.3	187.8
60	945	966.6	201.4	220.2	211.8	219.5	222.0	202.8

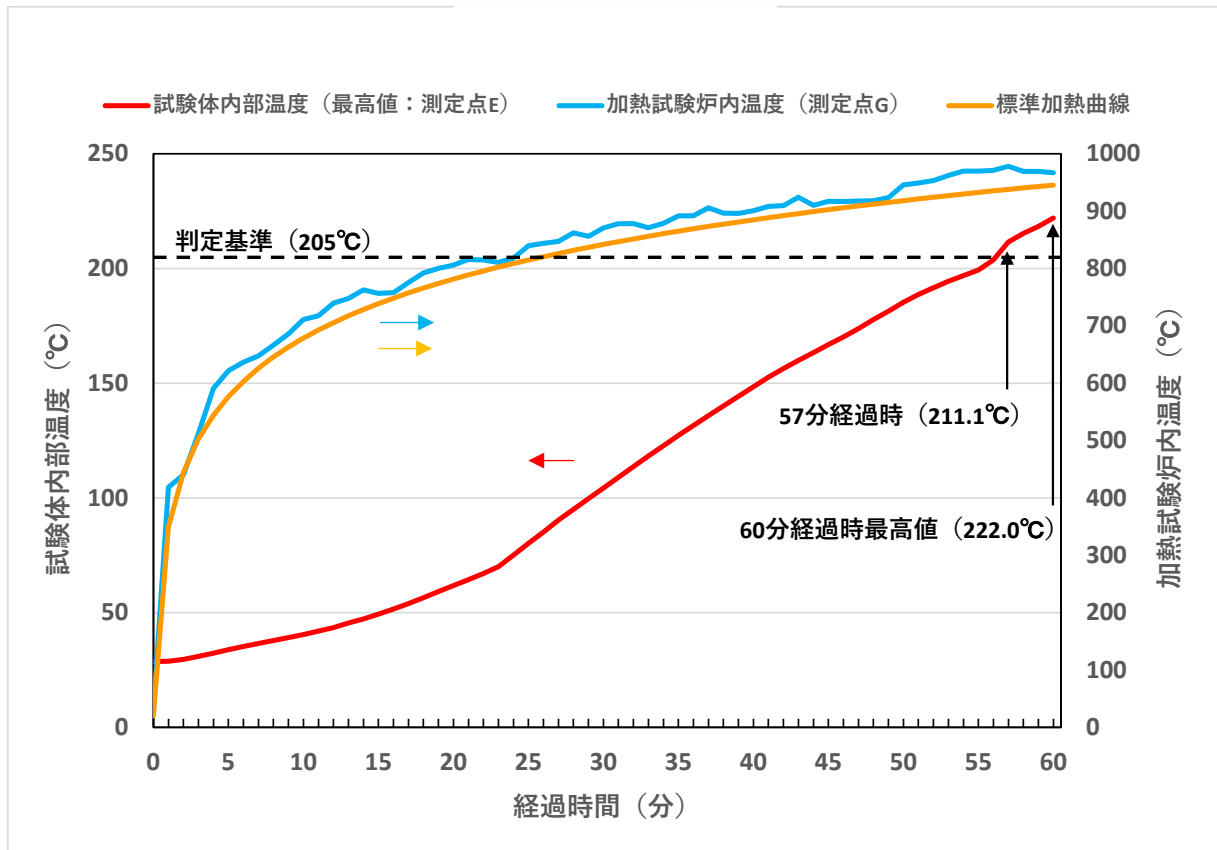


図 4.4 ケース 2 実証試験結果

ケース1の試験の結果、標準加熱曲線（ISO834 曲線）に基づく加熱開始から1時間経過後の945℃到達時に、試験体内部温度が最高で145.1℃となり、205℃以下であることを確認した。また、ケース2の試験の結果については加熱開始から57分経過時において211.5℃まで上昇し、判定基準である205℃に到達したが、到達時間は前項の火災影響評価において算出した原子炉建家貫通部周辺における火災等価時間13.2分を考慮すると十分な耐熱性を有することを確認した。

4.3 実設計への反映

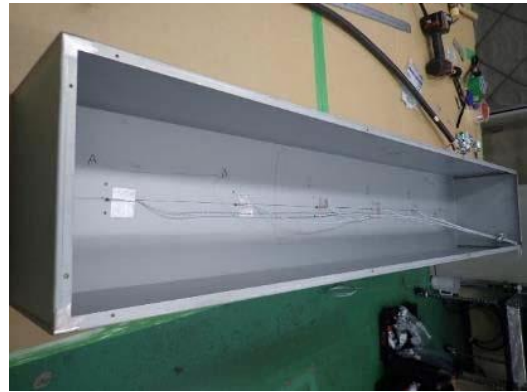
ケース2の試験では判定基準を満足しなかったが、それは試験終盤の数分（3分程度）である。

JRR-3の建家貫通部周辺でのケーブル火災の継続時間は13.2分であることを考えると、判定基準の1時間の耐熱性能は十分な余裕を持たせた設計要求であり、今回試験したいずれの場合においても、難燃シートは必要な時間（火災継続時間：13.2分）、火災から防護対象ケーブルの性能を護ることができるものである。

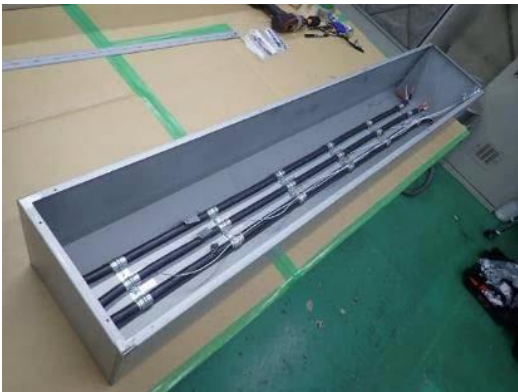
よって、今回試験を実施したとおり建家貫通部周辺の防護対象ケーブルについて、50mmの難燃シートで保護することとする。なお、40mmに圧縮した難燃シートは判定基準を満たさないものではあるが、上記の理由から、他のケーブルとの取り合いにより50mmでの施工が困難な箇所については、40mmまでシートを圧縮し施工することとする。



ケーブルトレイ模擬体



熱電対設置状態



ケーブル設置状態



難燃シート巻設状態



加熱試験炉外観



試験体設置状態

図4.5① 実証試験写真(その1)



加熱試験開始



加熱試験中（炉内）



加熱試験中（データ測定状況）



試験体外観（加熱試験終了時）

図 4. 5 ② 実証試験写真（その 2）

(参考資料)

○試験体と実際の構造との比較及び試験方法の妥当性について

実証試験については、JRR-3の原子炉建家貫通部の状況を鑑み、試験体の仕様及び試験方法を選定している。試験体の仕様は、ケーブルトレイ境界から原子炉建家貫通部までの間の剥き出しとなっている防護対象ケーブルについて鋼板で囲い、その外側を難燃シートで巻設することを実際に想定した機器（同じ材質、厚さ）で構成している。また、試験方法については他の部位等と同様に、建築基準法に基づく標準加熱曲線（IS0834 曲線）を用いている。複数ある一般系ケーブルの貫通部区分のうち1つの区分のケーブル火災を想定した場合、原子炉建家貫通部の構造やケーブル配置の状況から防護対象ケーブルの周囲全体を囲むような火災は考え難いことから、加熱条件としては片面（一方向）の加熱で十分であると考えられる。

なお、本試験を受注しているメーカーは、標準加熱曲線（IS0834 曲線）を用いた加熱試験に求められる知見・技術力を有しており、他の発電炉において同様の試験の実績があることを確認している。

表1 試験体と実際の構造（現場施工）との比較

項目		試験体	現場施工	備考（妥当性、保守性等）
難燃シート （複合材）	断熱材 （厚さ）	ファインフレックス BIO ブランケット （厚さ 50mm）	左記と同じ	実際の構造（現場施工）と同一であるため、妥当であると考えられる。
	表皮材 （厚さ）	コーテッドシリカクロス （厚さ 0.6mm）		
	内皮材 （厚さ）	ガラスクロス （厚さ 0.36mm）		
鋼板	材質	亜鉛メッキ鋼板（SECC）	左記と同じ	実際の構造（現場施工）と同一であるため、妥当であると考えられる。
	厚さ	1.6mm		
	大きさ	280mm(W) × 1500mm(L) × 226.6mm(H)	現場に合わせた大きさとする	試験体の鋼板は、建家貫通部の寸法を基に代表的な大きさとして決めている。現場施工用の鋼板の大きさと同一ではないが、本試験は難燃シート（断熱材）の厚さが十分であることの確認を目的としており、試験条件としては妥当であると考えられる。
加熱条件	加熱面	片面（一方向）	左記と同じ	建家貫通部の構造やケーブル配置の状況から防護対象ケーブルの周囲全体を囲むような火災は考え難く、片面（一方向）を加熱したときの内部温度（非加熱面温度）を測定する条件で十分であると考えられる。