

Hitz-B52 型のバスケットの概要

1. 設計方針

日立造船は、1978年に国産一号機の輸送キャスクである HZ - 75T 型キャスクを設計・製作して以来、多くの輸送キャスク、貯蔵キャスク等を設計／製造してきた実績がある。

それらのキャスクに用いられるバスケットは、大きく分けて以下①～④の4種類に分類される。

①チューブ&プレート型

使用済燃料を収納する部分を角チューブで形成し、それら角チューブを束ねる円盤状のプレートを軸方向に一定の距離を置いて複数枚配置し、これらのプレートにより角チューブ及びバスケット全体を構成し支持する構造のもの。

②チューブ&ブロック型

①の構造で円盤状のプレートの代わりに伝熱部材を兼ねたアルミニウム合金のブロックにより支持する構造のもの。

③プレート型

使用済燃料を収納する部分やこれを支持する部分をいくつかの形状の縦長のプレートを組み合わせて構成する構造のもの。

④菓子折り型

横通しのプレートを十文字形状に組み合わせて使用済燃料を収納する部分を形成し縦方向にこれを順次積み重ねる構造のもの。

表 1-1 にこれまで日立造船が設計／製造した使用済燃料用キャスク（海外向けキャニスタ含む）を示す。表中には、これらのキャスク（キャニスタ）に用いられているバスケットの構造タイプを上述の番号で示す。

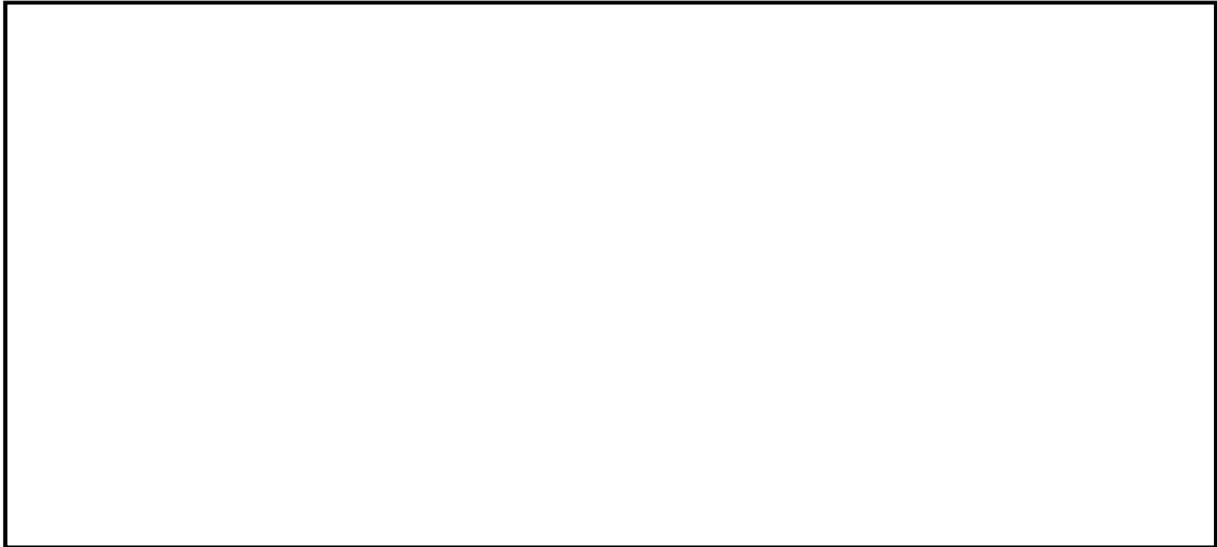
表 1-1 に示すように、日立造船では主に①チューブ&プレート型及び②チューブ&ブロック型バスケットの設計／製造実績が多くあり、設計・解析、製造並びに製造検査のノウハウを蓄積している。

そのため、Hitz-B52 型のバスケット開発にあたっては、①又は②に基づいた構造を基本としつつ、収納燃料仕様、輸送貯蔵キャスクに要求される安全機能等に対応するため一部新技術も取り入れる方針とした。

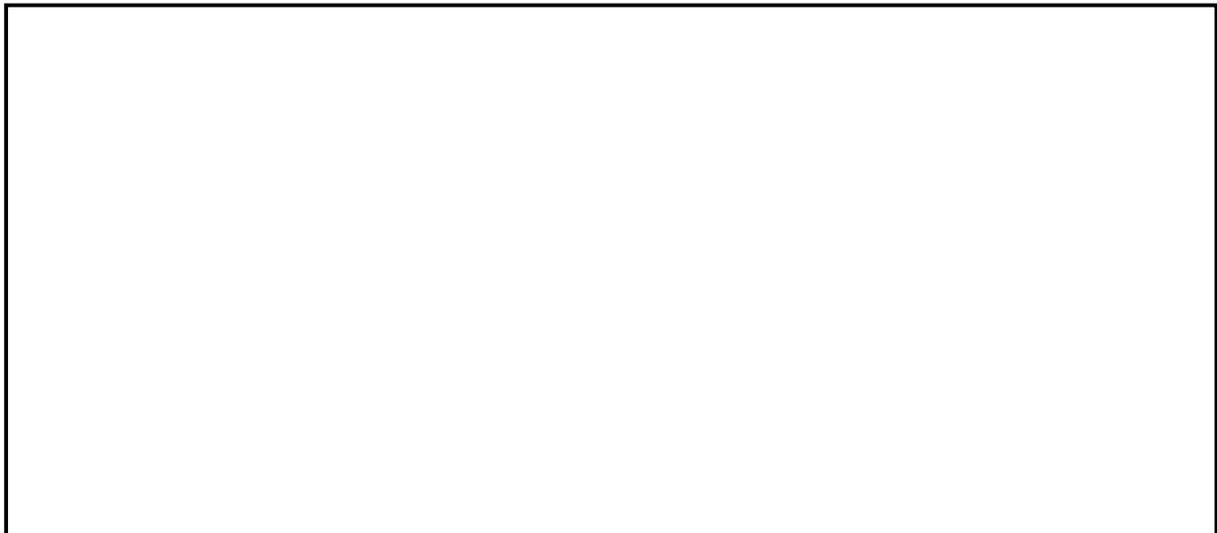
表 1-1 日立造船で設計／製造した主な使用済燃料用キャスク（キャニスタ）と
バスケット構造タイプ

形式	用途	バスケット 構造タイプ	備考
HZ-75T 型	輸送用	③	設計・製造
NH-25 型	輸送用	③	設計・製造
EXCELLOX-3B/3 型	輸送用	①	製造
EXCELLOX-4 型	輸送用	①	製造
TN-12/2 型	輸送用	②	製造
NFT-14P 型	輸送用	①	(設計) *1・製造 参考写真 1-1
NFT-10P 型	輸送用	①	設計・製造 (NFT-14P 型 と類似構造)
NFT-22B 型	輸送用	①	設計 参考図 1-1
東海第二発電所乾式貯蔵キャスク	貯蔵用	②	設計・製造 参考写真 1-2
NAC-100S/T	貯蔵用	②	製造
TN-68 用バスケット	貯蔵用	②	製造
NAC UMS キャニスタ	輸送貯蔵用	①	製造 参考写真 1-3
NUHOMS 61BT キャニスタ	輸送貯蔵用	①	製造
NUHOMS 24PHBL キャニスタ	輸送貯蔵用	①	製造 参考写真 1-4
NUHOMS 32PTH キャニスタ	輸送貯蔵用	①	製造
NAC 37PWR MAGNASTOR キャニスタ	輸送貯蔵用	①	製造

*1：メーカ 4 社で開発に参画。



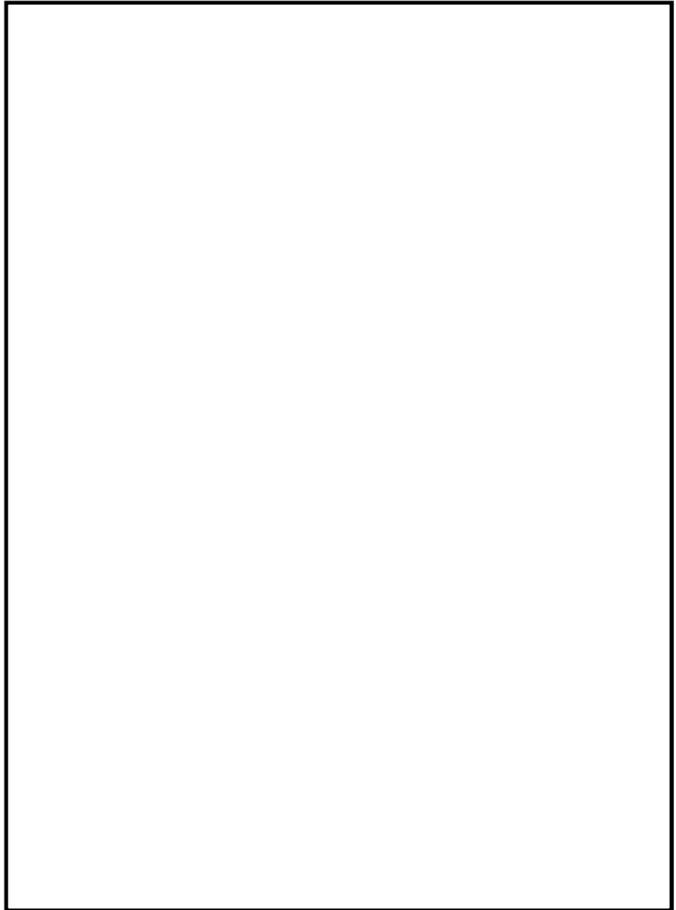
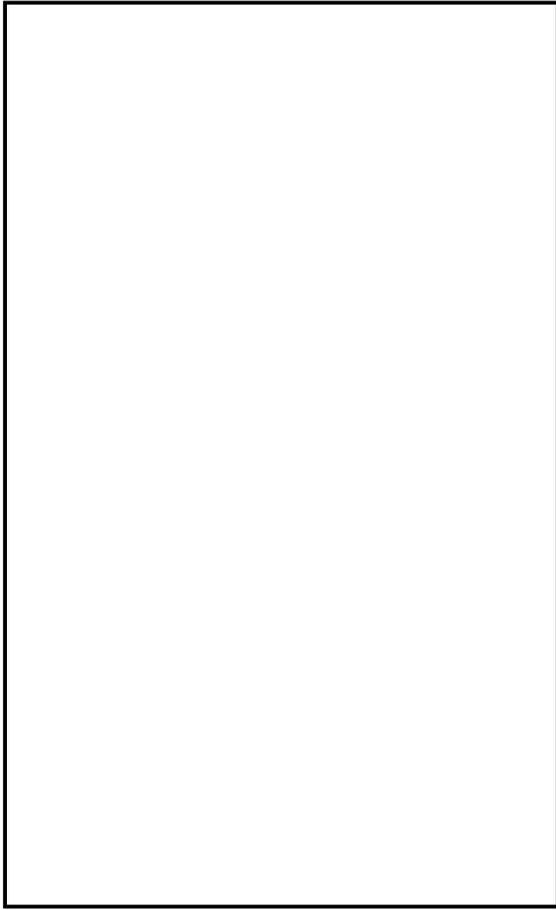
参考写真 1-1 NFT-14P 型バスケット



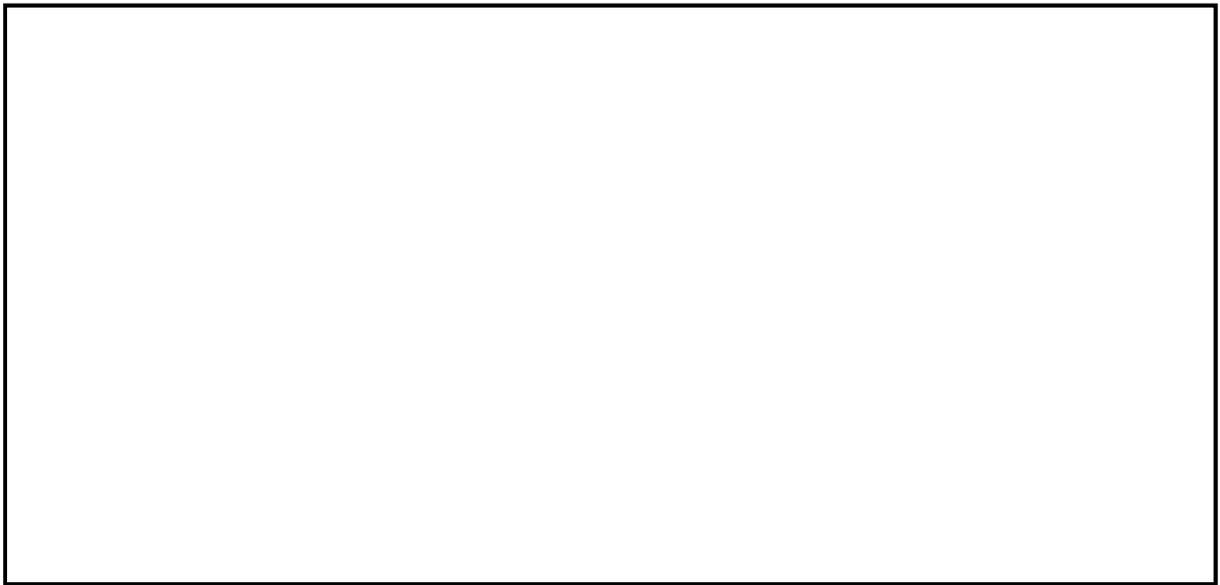
参考写真 1-2(1) 東海第二発電所乾式貯蔵キャスクバスケット



参考写真 1-2(2) 東海第二発電所乾式貯蔵キャスクバスケット組立状況



参考写真 1-3 NAC UMS 用バスケット 参考写真 1-4 NUHOMS 24PHBL 用バスケット



参考図 1-1 NFT-22B 型バスケット構造図

2. 構造の概要

Hitz-B52 型のバスケットは、燃料集合体を収納する炭素鋼製のコンパートメント（以下、角チューブと同義）、臨界防止のためにコンパートメント間に配置する中性子吸収材、コンパートメント間の隙間を保持するスペーサー、これらを束ね径方向の荷重を支持するためのサポートプレート、並びに上部及び底部プレートで構成される。

バスケットの全体構成は、外周のコンパートメントをサポートプレート等で結合し、上下端は上部及び底部プレートとボルトで締結することで全体の構造を成している。（図 2-1）

サポートプレートは、 分割し、
 にサポートプレートを締結している。
 を有している。サポートプレートは 分割しているので、
、コンパートメント等はキャスク本体胴内のごく限定された範囲
で径方向に広がる方向に変位する可能性があるが、
 を拘束し、9m 落下のような大きな衝撃加速度が発生する場合には、コンパートメント等の変位を制限することにより、コンパートメント、スペーサー及び中性子吸収材の幾何学的配置が損なわれない構造としている。

以上に述べたコンパートメントを束ね、各コンパートメントの間に中性子吸収材を配置する構造は、使用材料は異なるものであるが、基本的な設計概念は、東海第二発電所使用済燃料乾式貯蔵キャスクで採用しているものと同じであり、未臨界設計、除熱設計及び構造強度設計で実績がある。（図 2-2）

また、外周のコンパートメントにサポートプレートを 、バスケット全体を構成する基本構造は、NFT-22B/14P 及び NAC UMS 型バスケットと同じ設計概念であり、貯蔵時の地震の影響や輸送時の特別の試験条件下の水平落下に対し、十分な構造強度を有している。（図 2-3～図 2-4）

サポートプレートは上下方向に一定の間隔で配置しているが、サポートプレートの間で外周のコンパートメントとキャスク本体胴内面との間には、 アルミニウム合金製のブロックを配置している。バスケットの構造強度評価においては、アルミニウム合金製ブロックは 、アルミニウム合金製ブロック及び
 している。外周にアルミニウム合金製ブロックを配置するバスケットの構造は、除熱設計の観点では東海第二発電所乾式貯蔵キャスクで採用されている設計と同じである。（図 2-2）

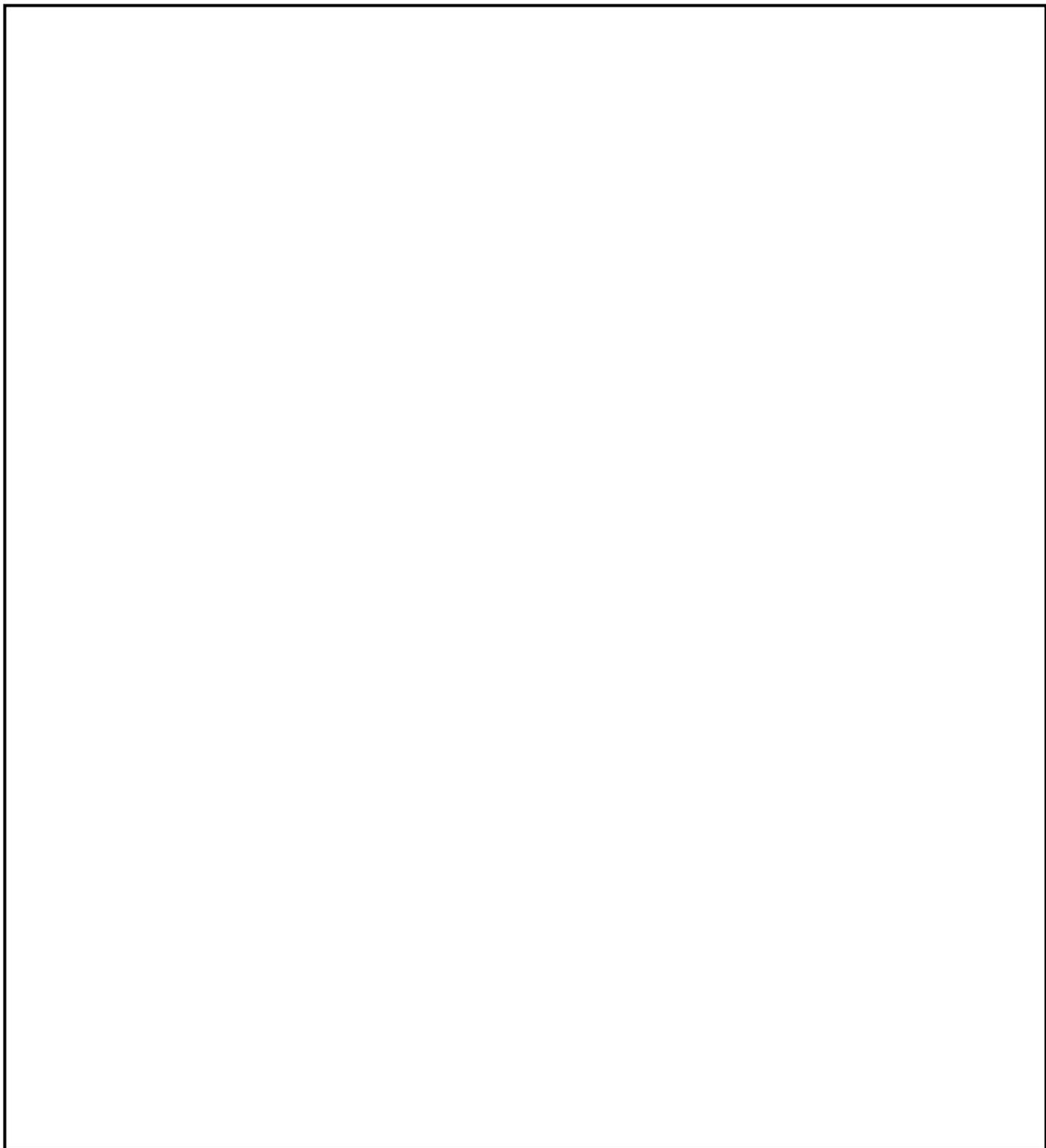


図 2-1 Hitz-B52 型金属キャスク 鳥観図

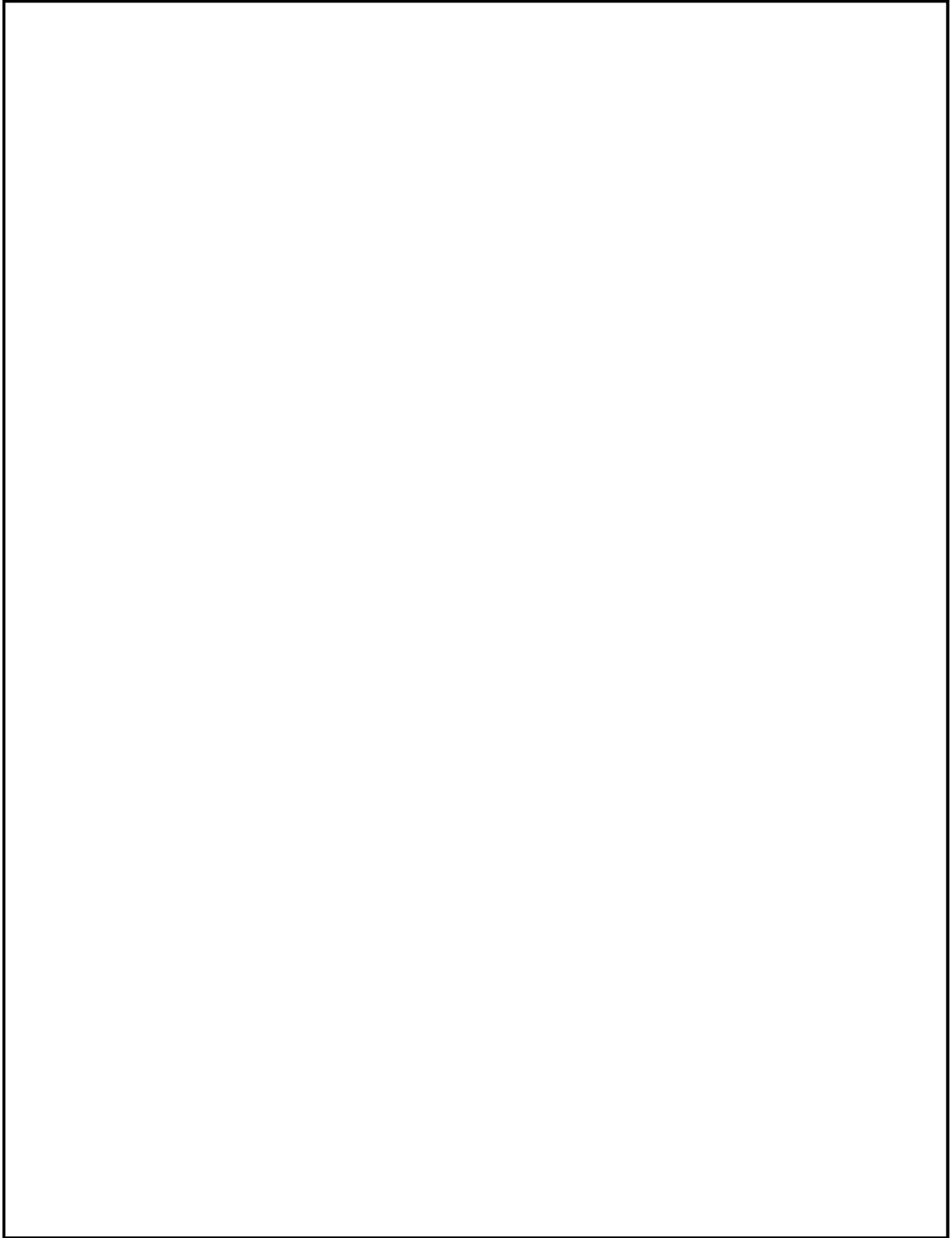


図 2-2 東海第二発電所使用済燃料乾式貯蔵キャスク 鳥観図

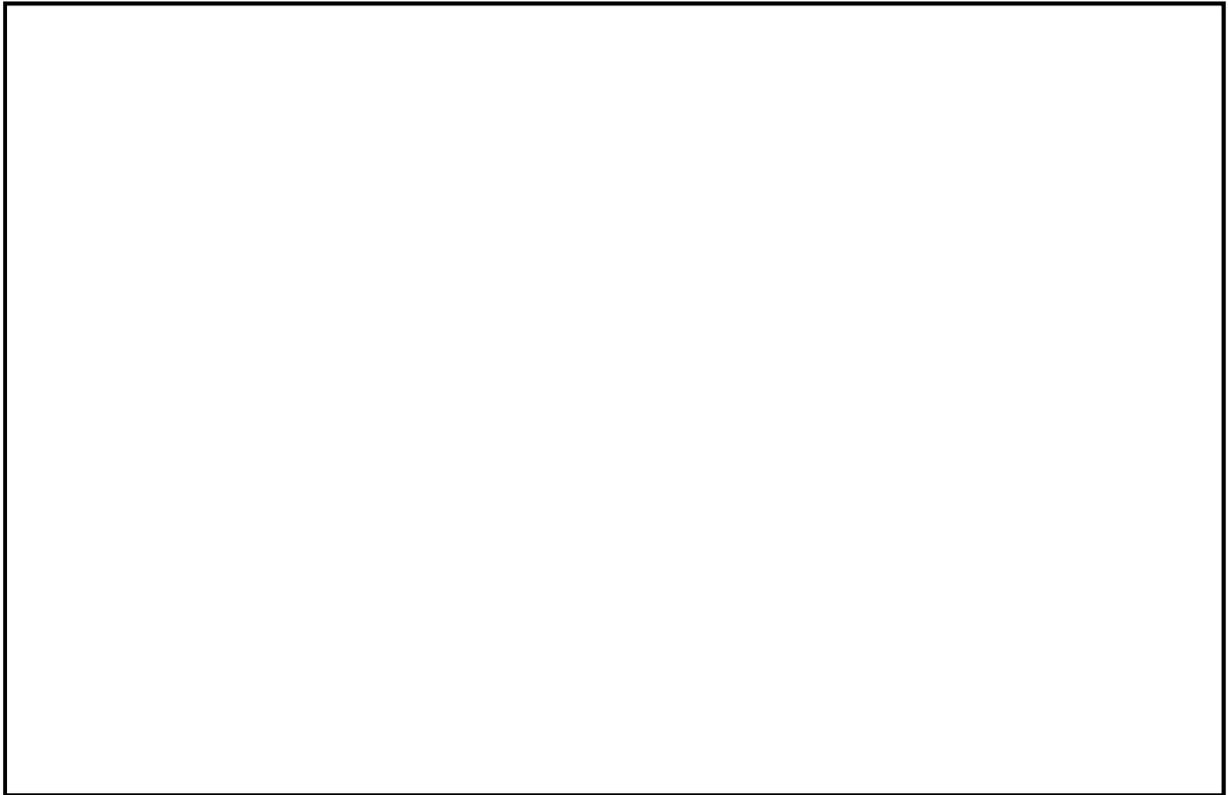


図 2-3 NFT-22B 型輸送容器 鳥観図



図 2-4 NAC UMS バスケット 鳥観図

3. 安全設計

3.1 除熱

現在運用中の東海第二発電所乾式貯蔵キャスクは、使用済燃料を収納する部分をチャンネルと呼ばれる角チューブで形成し、角チューブ間に中性子吸収材を配置する構造である。チャンネルの外周は、アルミニウム合金製のサポートブロックによって保持する構造である。(図 3-1)

Hitz-B52 型では、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの 部材は、 サポートプレートと アルミニウム合金製サポートブロックとで構成される。Hitz-B52 型は、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクと同様、外周の 通して周囲に熱を放出する機能を果たしており、角チューブ間に中性子吸収材を、角チューブ等の周囲に という点で同等の設計である。

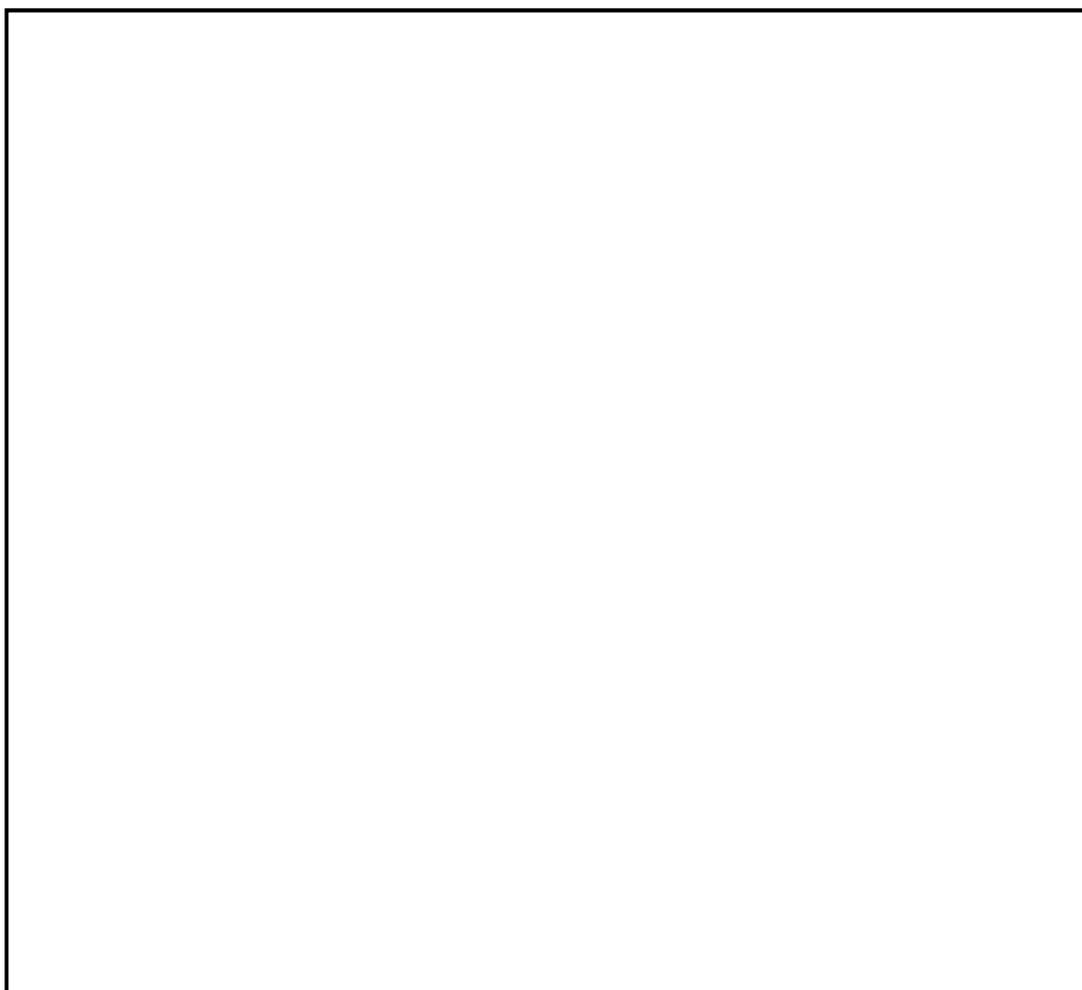


図 3-1 東海第二発電所乾式キャスクバスケット構造図

Hitz-B52 型の除熱解析では、構造の類似性を考慮し東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの解析手法を踏襲し、モデル化等の考え方を採用している。

解析方法の妥当性については、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの完成時検査で実施された伝熱検査の結果により確認することができる。伝熱検査では、解析値と、代表キャスクについて模擬発熱体を用いた伝熱検査の測定値の比較による確認を行うことにより、類似設計である Hitz-B52 型の除熱設計も妥当であると考えられる。詳細を別紙 1 に示す。

3.2 構造強度

角チューブの周りをサポートプレートで支持する構造は、NFT 型キャスク、NAC UMS で製造実績があり、国内では NFT 型キャスクの許認可実績がある。

Hitz-B52 型ではコンパートメント周囲に配置する [] 構成されているが、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクでは、[] サポートブロックにて角チューブ等を保持した構造であり、サポートブロックで支持するという点で類似設計であるといえる。

構造強度解析では、これらの構造の類似性から同等の解析手法を採用した。

さらに本構造は、国内における NFT 型キャスク及び東海第二発電所乾式貯蔵キャスク、米国における NAC UMS キャニスタで設計、許認可実績があり、同様の解析手法を採用することで、設計の妥当性が確認される。

(1) [] の妥当性

バスケットの基本構造は許認可実績及び製造実績のあるものであるが、今回新たに採用する構造として [] がある。この部分について、以下のとおり説明する。

[] 分割したサポートプレートを [] 締結するための構造体であり、[] 各部品により構成される。[] 分割されたサポートプレートの [] サポートプレートを [] 構造で、サポートプレートに [] [] 構造である（図 2-1 参照）。

設計では、まず [] にかかる外力による変形及び発生する応力の関係を部分的に詳細なモデルを用いた FEM 解析により評価し、設計上想定される荷重に余裕を見た範囲の荷重に対して [] の応力-ひずみ関係が線形に応答し、[] 挙動を示すことを確認した。この結果を用いて、バスケットの構造強度解析モデル（部分断面輪切りモデル）では、[] 部分を解析で得られた応力-ひずみ関係 [] を有する [] でモデル化している。しかしながら、本構造は過去に審査実績等がないと考えていることから、[] を模擬したモックアップ試験を実施し、設計の妥当性を確認した。（別紙 2）

試験の結果、設計上想定される荷重に余裕を見た荷重の範囲で、[] に加わる荷重と変位の関係は、線形の挙動を示し、[] で模擬することの妥当性を確認した。

一方、試験の結果から評価された [] は、部分詳細モデルの解析から評価された [] よりも小さく、設計に用いた [] は必ずしも安全側ではない可能性が示された。試験と解析で差異が生じた理由として、実際の構造は、部

品の加工精度、部品の組立て精度等の影響があり、部品間の位置関係が必ずしも解析モデル通りではない一方、解析モデルでは加工精度や組立精度を考慮しないことが試験結果と解析結果の差異に影響を及ぼしたものと考えられる。

上述の試験に加えて、バスケット全体の製作精度を考慮して、分割したサポートプレート同士に、設計上想定される上限の位置ずれを意図的に与えた試験を実施し、への影響を確認した。

(2) 解析モデルへの反映

解析で設定するは、バスケットの幾何学的形状の維持を評価するという観点で、が保守的である。は、試験結果に基づいて標準的な試験結果に加えて、設計で想定される種々の製造精度を考慮した影響を包含した値に設定することが妥当である。

試験結果（別紙 2 参照）を考慮したして、解析による評価を行った結果は次のとおりである。

サポートプレートが小さくなることによりバスケット全体の変位量は大きくなるが、コンパートメント間の口開き量は弾性解析の結果、であることを確認していることから、中性子吸収材が移動・脱落することはない。発生応力については、が減少することから、サポートプレートの局部応力やコンパートメントの応力が減少した。一方、の減少により、サポートプレートの一般部の応力は増加したが、許容値内に収まることを確認した。

したがって、試験結果のの反映による構造強度評価への影響及び幾何学的形状への影響を考慮しても、安全機能に影響はない。

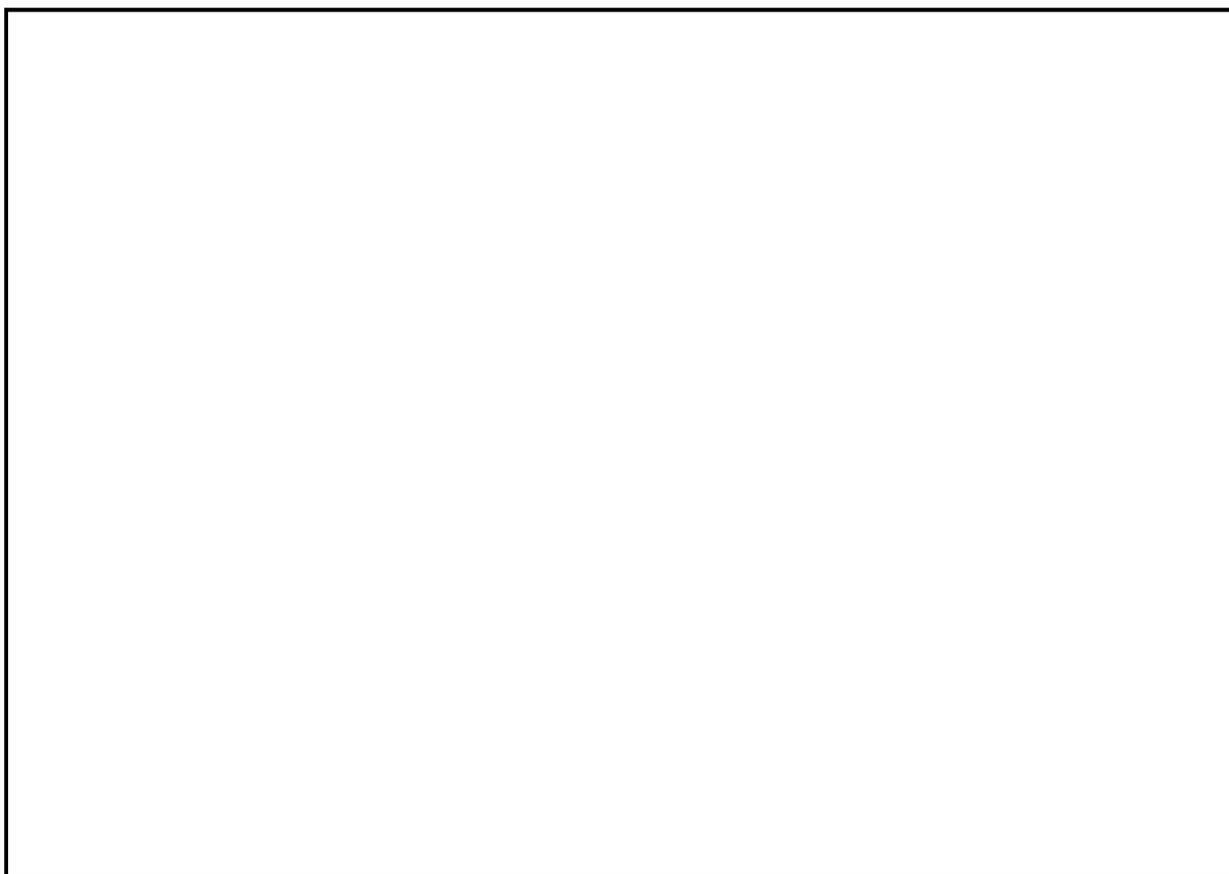
4. 製作方法の概要

- ・ 製造実績

コンパートメントを束ね、各コンパートメントの間に中性子吸収材を配置する構造は、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクと同様の設計概念であり、日立造船で製造実績を有する。

- ・ 概略製造手順

Hitz-B52 型のバスケットは、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクと類似の構造であるため、その製造手順を参考とし、次の手順を計画している。



- ・ モックアップ等による確認

- (1) コンパートメント試作

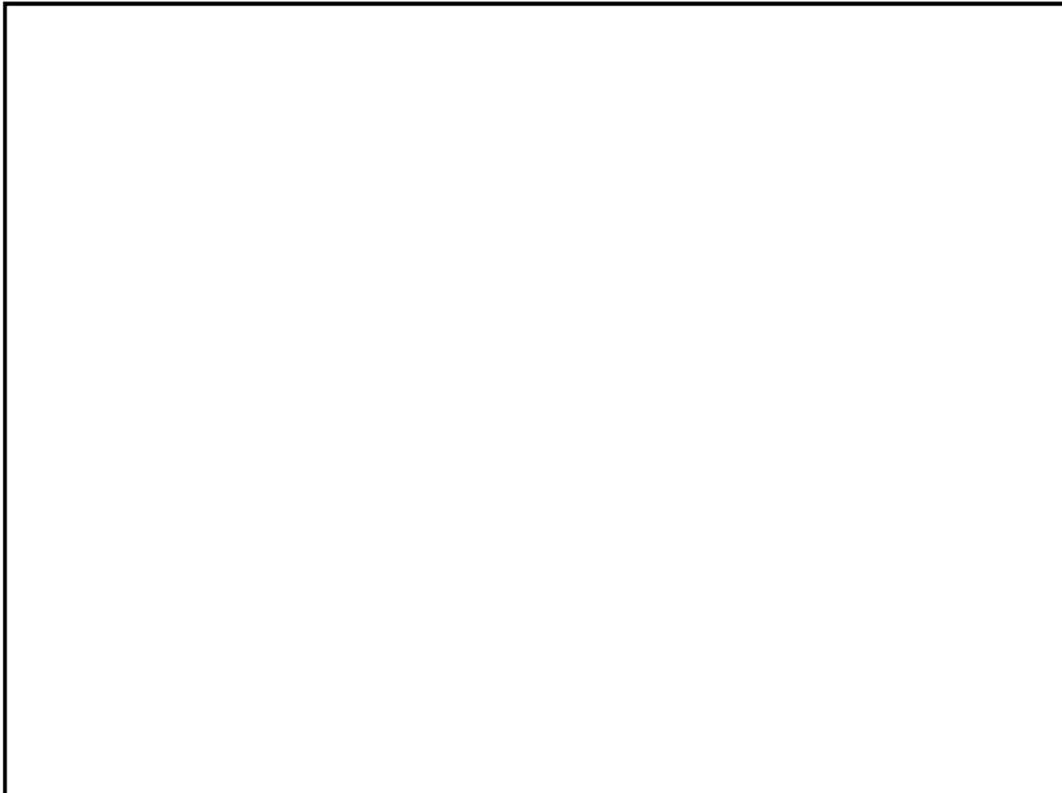
同様の炭素鋼製角チューブについては、米国 NAC 社向けのキャニスタ用バスケットにおいて、製造実績を有しており、今回、実機と同様の材料及び を用いた接合により、コンパートメントのモックアップを製造し、製造公差、溶接変形等を確認している。(参考写真 4-1)



参考写真 4-1 コンパートメントのモックアップ（実機相当）

(2)

実機バスケットの構成要素を評価するため、模擬体を製作（参考写真 4-2）し、製作性、製作精度等の確認を行った。



参考写真 4-2 バスケット模擬体

東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの伝熱検査結果による設計の妥当性の確認

1. 概要

金属キャスクは製造時に、代表キャスクについて模擬発熱体を用いた伝熱検査を行うことが要求されている。Hitz-B52 型バスケットと基本的な伝熱構造が同等（角チューブ構造 ブロック）である東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの解析値と伝熱検査測定値の比較による確認を行うことにより、本バスケット構造の伝熱解析の妥当性を確認することができる。

2. 構造

検討対象である東海第二発電所乾式貯蔵キャスクの構造を図 1 に、バスケットの概要を図 2 に示す。

チャンネルと呼ばれる角チューブ 61 体とその間に中性子吸収材を配置し、外側から 部材にて束ねる構造である。

3. 検査方法

角チューブ内に 61 本のヒータを挿入し、設計発熱量以上となるよう加熱する。バスケット中心部及び内胴内面に熱電対を取り付け、各部の温度を計測する。温度計測位置を図 3 に示す。

4. 判定基準

判定基準は次のとおりである。

周囲温度を 45℃としたときのバスケット中心部及び内胴内面温度が最高使用温度以下であること。

(1)バスケット中心部において 210℃以下であること。

(2)内胴内面（軸方向中央部）において 160℃以下であること。

5. 計測結果

計測結果を表 1 に示す。また、計測結果と解析結果の比較を図 4 に示す。なお、計測温度は 26℃であるので、45℃の計測結果となるよう補正を行った数値を表 1 に示している。

解析及び計測の結果、バスケット中心温度及び内胴内面の温度は最高使用温度を下回ることが確認できる。さらに、計測結果は解析結果を下回るとともに、計測点数は少ないものの大まかな温度分布の傾向は類似していることが確認できる。

6. 考察

以上より、東海第二発電所乾式貯蔵キャスクのバスケット構造の解析結果は妥当であると言える。

Hitz-B52 型のバスケットは同様の構造であり、除熱解析手法も同様としていることから、Hitz-B52 型の除熱評価方法は妥当である。

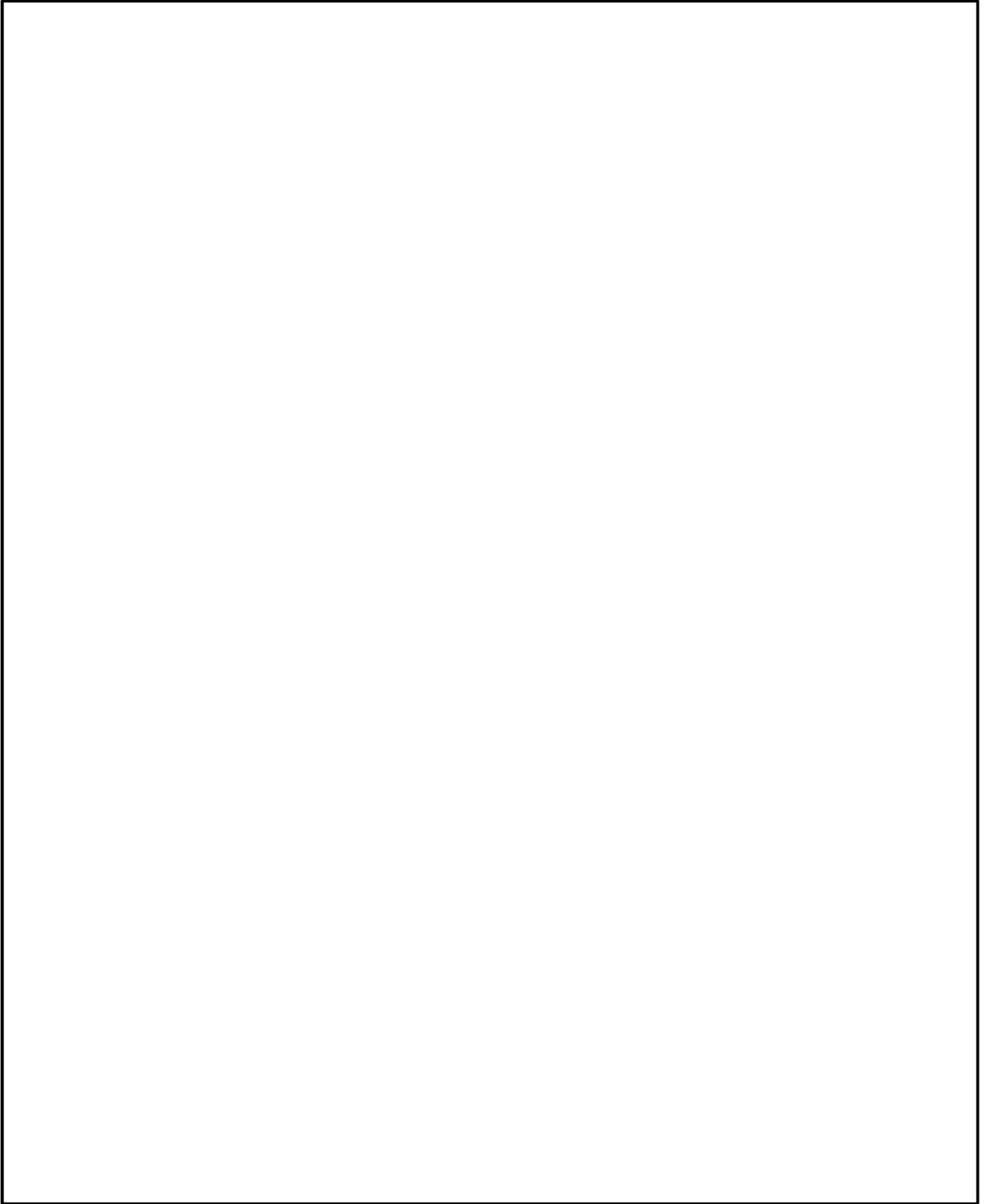


図 1 東海第二発電所乾式貯蔵キャスク概要図

別紙 1-3

内は商業機密のため、非公開とします。

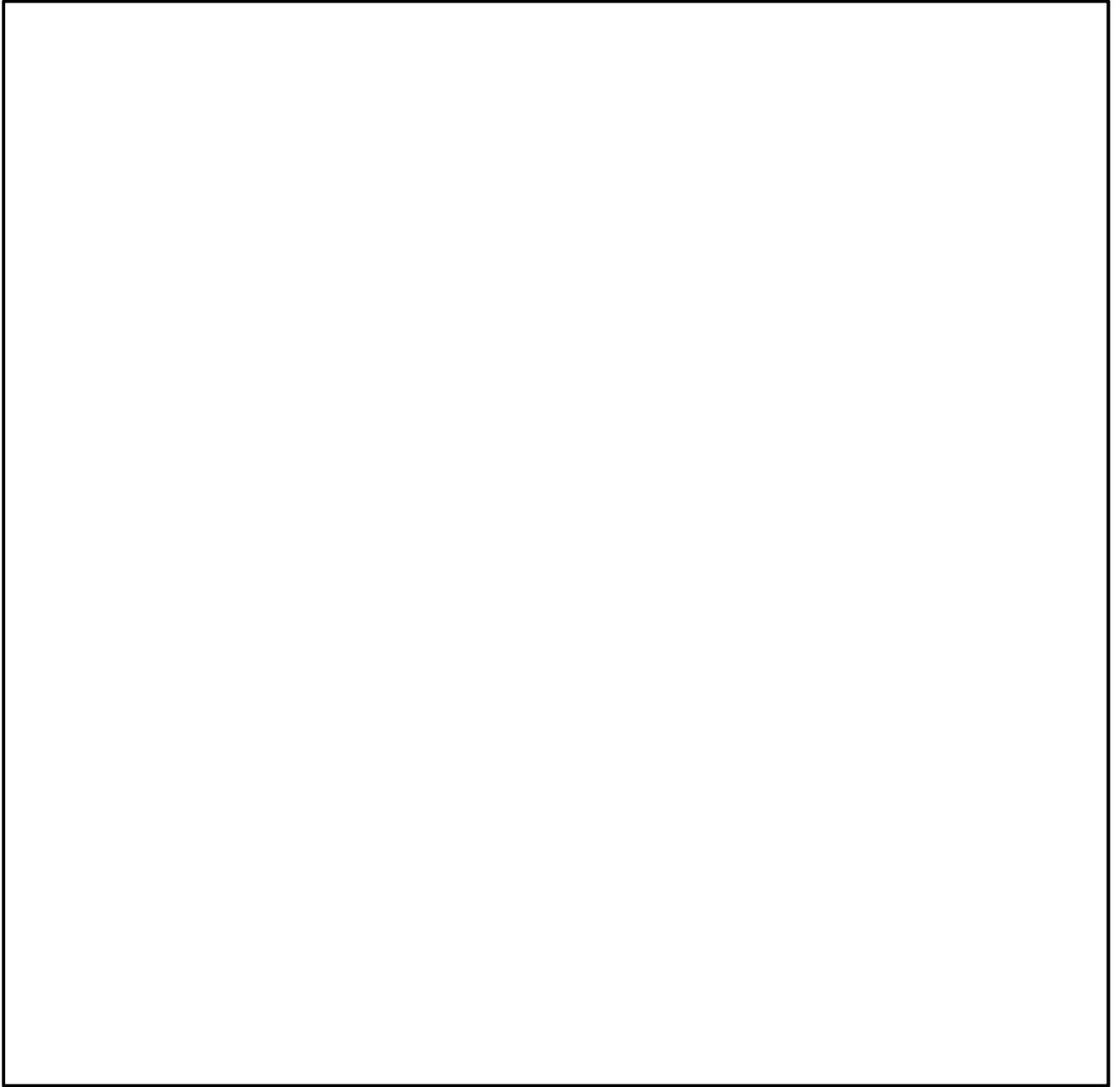


図 2 東海第二発電所乾式貯蔵キャスク バスケット概要図

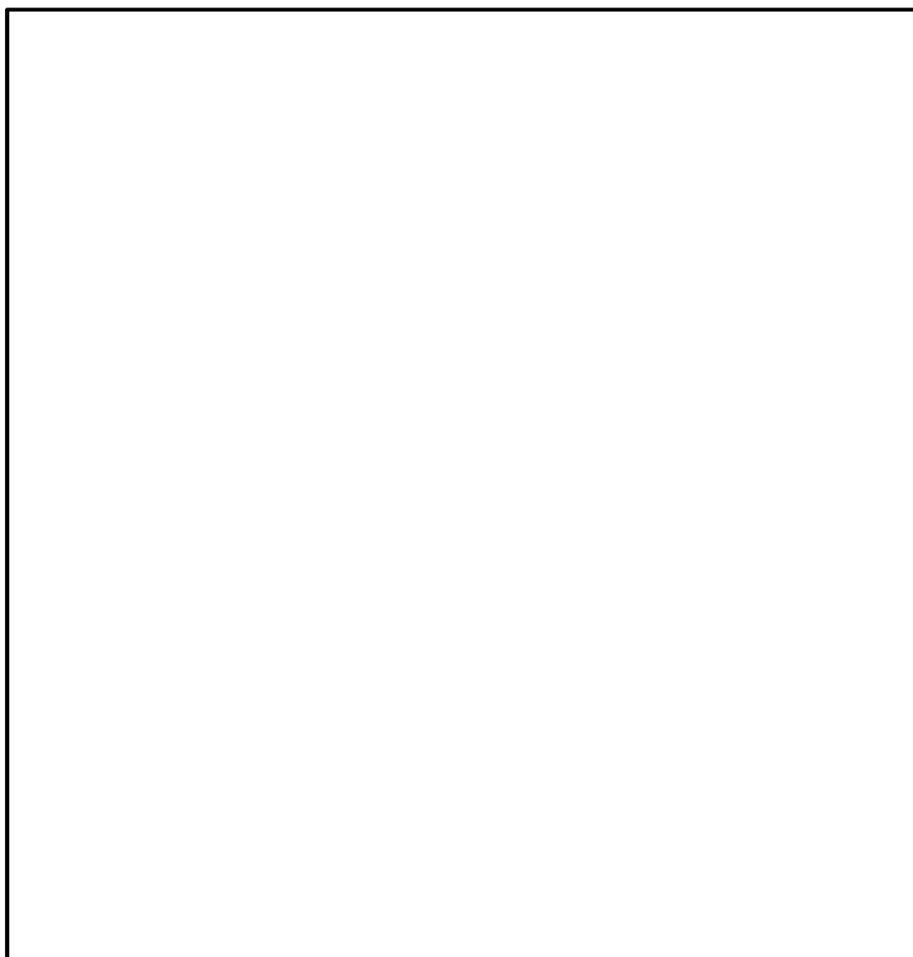


図 3 温度計測位置



図 4 除熱解析結果と測定結果の比較

表 1 計測結果

	[Redacted]					
規定発熱量 (kW)	17.1					
測定発熱量 Q (kW)	[Redacted]					
測定環境温度 Ta (°C)	[Redacted]					
測定温度 Tm (°C)	[Redacted]					
補正温度 Tc (°C) ⁽¹⁾	[Redacted]					
判定基準 (°C)	210	160	210	160	210	160
判定	○	○	○	○	○	○

備考(1)：補正温度は次の計算式にて算出する。

$$T_c = (T_m - T_a) \times \frac{17.1}{Q} + 45$$

モックアップ試験

1. 概要

2. 試験体

3. 試験方法及び評価方法



4. 試験結果

全ての試験において、荷重－変位関係は負荷した荷重の範囲で概ね線形であった。得られた標準試験条件（試験体①）の結果を図4に示す。



5. 考察及び解析に適用するばね剛性値

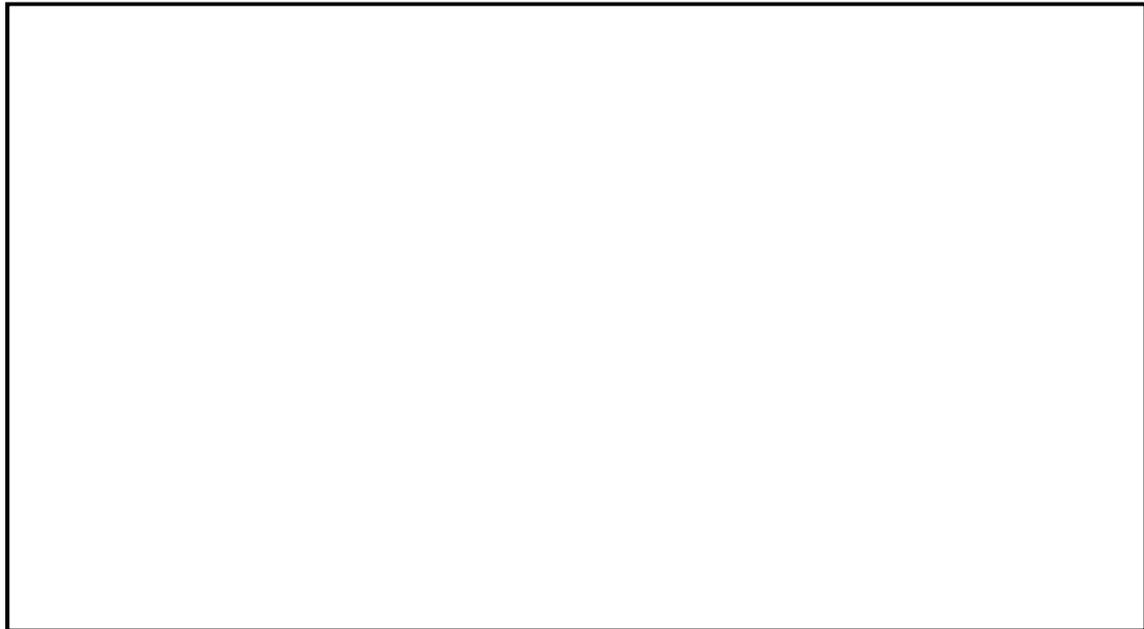


表 1 試験結果

試験体	条件	荷重	締付けトルク	試験結果
試験体①				
試験体①				
試験体②				
試験体③				

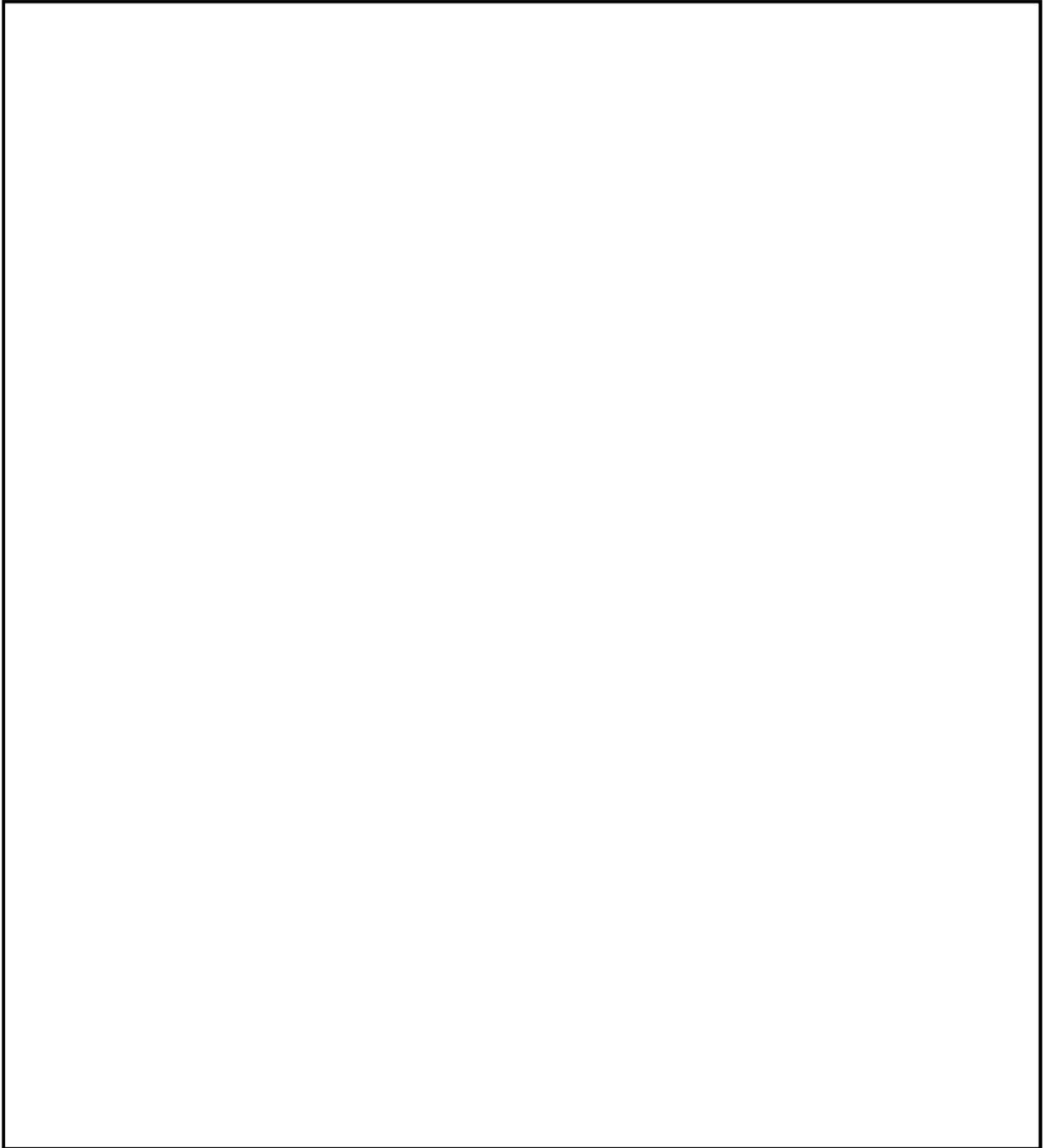


図 1 試験体概略図 (試験体①)

別紙 2-3



内は商業機密のため、非公開とします。

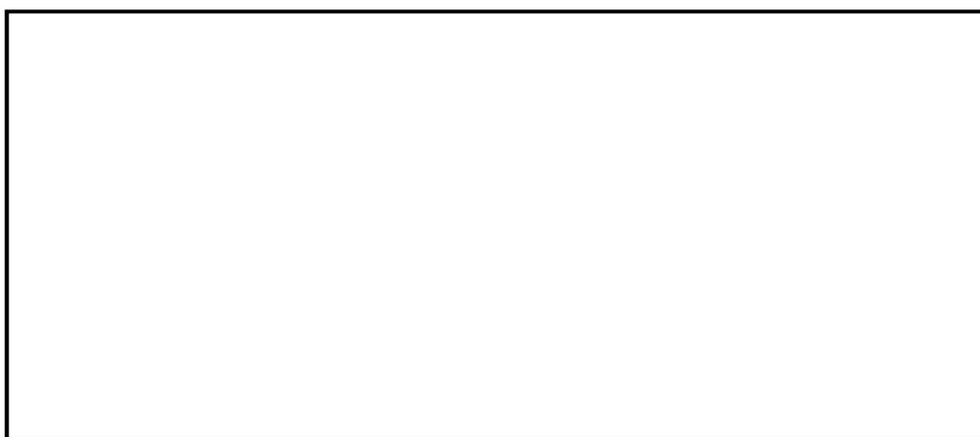


図 2 詳細 (試験体②)



図 3 詳細 (試験体③)



写真 1 疲労試験機に取り付けた際の試験体写真（試験体②）

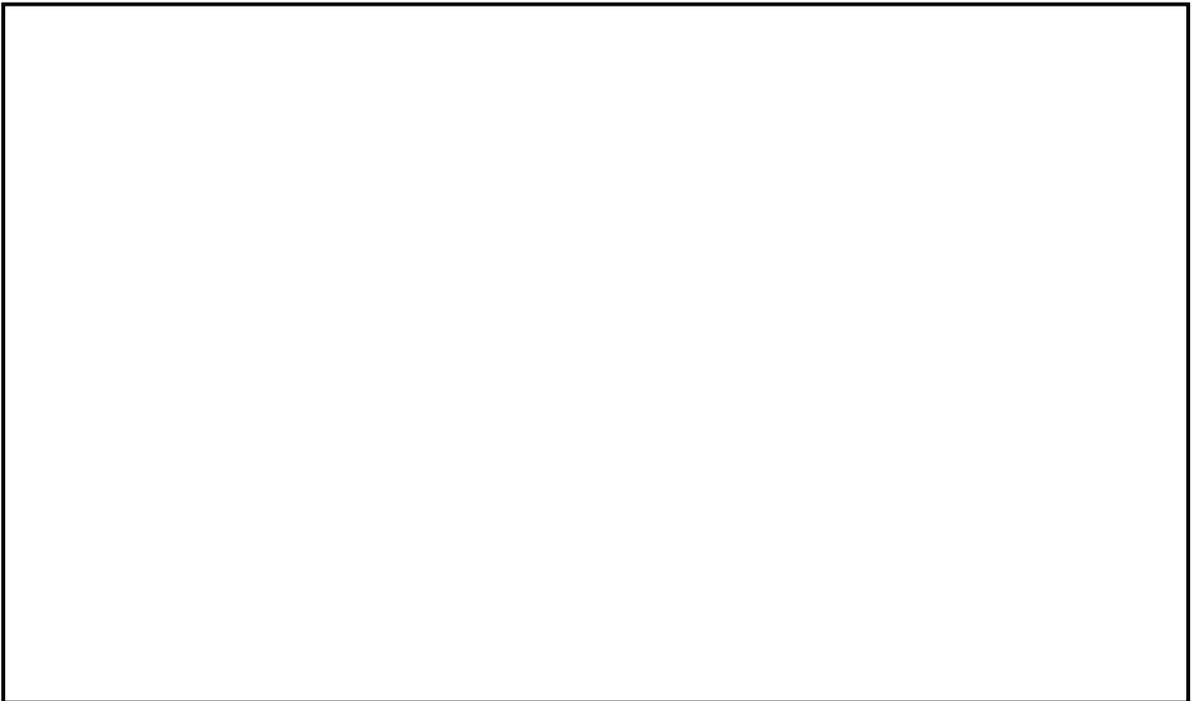


写真 2 写真（試験体①）

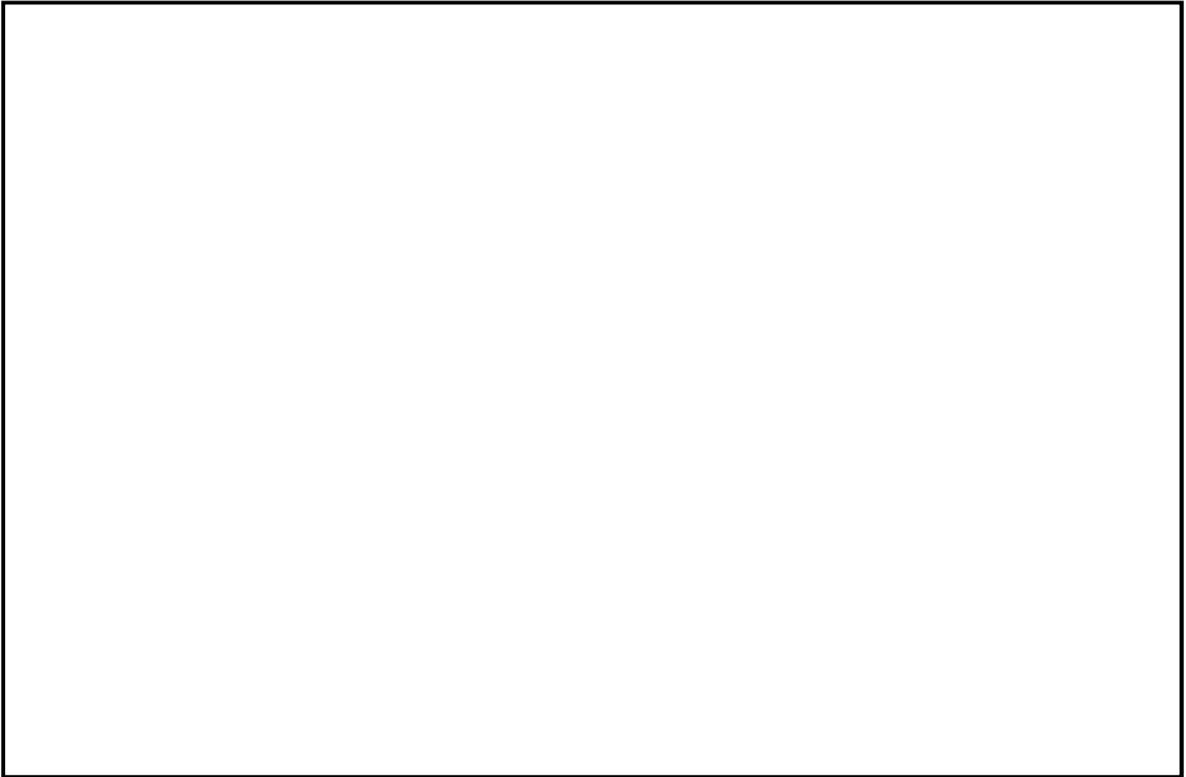


図 4 標準試験結果 (試験体①)