

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-021-4 改 6
提出年月日	2020年5月20日

ブローアウトパネル関連設備の設計方針に係る補足説明資料

2020年5月

東京電力ホールディングス株式会社

## 目次

4-1	ブローアウトパネル関連設備の要求機能について	4-1-1
4-2	ブローアウトパネルの配置と構造について	4-2-1
4-3	クリップ引張試験について	4-3-1
4-4	ブローアウトパネルの開放機能を担保する設計条件について	4-4-1
4-5	原子炉建屋内側ブローアウトパネルの配置と構造について	4-5-1
4-6	クリップ破損時の他設備への影響について	4-6-1
4-7	燃料取替床ブローアウトパネルの飛出し挙動について	4-7-1
4-8	ブローアウトパネル開放時の他設備への影響について	4-8-1
4-9	燃料取替床ブローアウトパネル及び主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの保安全管理について	4-9-1
4-10	ブローアウトパネル機能確認試験要領について	4-10-1
4-11	ブローアウトパネル機能確認試験結果について	4-11-1
4-12	ブローアウトパネル開放時の設計基準事故時被ばく評価への影響について	
4-13	ブローアウトパネル閉止装置の配置と構造について	4-13-1
4-14	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の技術基準規則第五十四条への適合性について	4-14-1
4-15	ブローアウトパネル閉止装置のパッキン耐久性試験について	4-15-1
4-16	ブローアウトパネル閉止装置の保安全管理について	4-16-1
4-17	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験要領について	4-17-1
4-18	ブローアウトパネル閉止装置の閃ピンと閃受の熱膨張による影響について	4-18-1
4-19	燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験結果について	4-19-1
4-20	燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（自主対策設備）の配置と構造について	4-20-1
4-21	ブローアウトパネル関連設備の先行電力との差異について	4-21-1

今回提出資料

## ブローアウトパネル関連設備の要求機能について

## 1. はじめに

ブローアウトパネル関連設備（燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）、主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室 BOP」という。）、燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロ BOP 閉止装置」という。）、燃料取替床ブローアウトパネル強制開放装置（以下「オペフロ BOP 強制開放装置」という。））について、技術基準上の主な要求事項を整理した。

## 2. オペフロ BOP の要求事項

## (1) 開放機能

オペフロ BOP は、主蒸気管破断（以下「MSLBA」という。）を想定した場合の放出蒸気による圧力から原子炉建屋や原子炉格納容器等を防護するため、放出蒸気を建屋外に放出することを目的に設置されている。このため、建屋の内外差圧により自動的に開放する機能が必要である。（技術基準規則 第 12 条 溢水等による損傷の防止）

設計基準対象施設であるオペフロ BOP は、待機状態（閉状態）にて、基準地震動  $S_s$  により開放機能を損なわないようにする必要があるため、基準地震動  $S_s$  に対する耐震健全性（建屋躯体の健全性）を確保する設計とする。また、設計竜巻により開放機能を損なわないようにする必要があるが、設計竜巻は、その発生頻度が非常に小さく、設計基準事故との重畳は、判断基準の目安となる  $10^{-7}$  回/年を下回り十分小さいこと、プラント運転中又は停止中の設計竜巻を想定してもプラント停止及び冷却に必要な設備は確保でき原子炉安全に影響しないことから、安全上支障のない期間に補修が可能な設計とすることで安全機能を損なわない設計とする。

重大事故等対処設備であるオペフロ BOP は、格納容器バイパス（以下「ISLOCA」という。）発生を想定した場合の発生箇所を隔離するための操作等の活動ができるよう、所定の時間内に原子炉建屋原子炉区域（以下、「原子炉区域」という。）の圧力及び温度を低下させるため、確実に開放する必要がある。（技術基準規則 第 61 条 原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備）

ISLOCA 発生時においては、原子炉格納容器外かつ原子炉区域で低圧設計配管が破断することを想定しているため、原子炉区域で瞬時に減圧沸騰して大量の水蒸気が発生する。このため、原子炉区域の圧力が急上昇するが、外気との差圧（設計圧力 3.43kPa 以下）で燃料取替床に設置したオペフロ BOP が自動的に開放し、原子炉区域内を減圧する設計とする。

また、開放したオペフロ BOP の開口面（全面）を経由して外気と熱交換が行われることにより原子炉区域内でも人力で ISLOCA 発生箇所を隔離するための隔離弁が操作可能となる。なお、ISLOCA 発生時には、基本的に中央制御室で隔離弁を閉操作するが、万が一中央制御室から操作できない場合には、現場で隔離弁を操作することとしている。

重大事故等対処設備であるオペフロ BOP は、待機状態（閉状態）にて、基準地震動  $S_s$  により開放機能を損なわないようにする必要があるため、基準地震動  $S_s$  に対する耐震健全性（建屋躯体の健全性）を確保する設計とする。

## (2) 2次格納施設のバウンダリ機能

オペフロ BOP は、上記(1)の開放機能を満足させるため、原子炉区域外壁に設置されており、原子炉区域の壁の一部となることから、2次格納施設のバウンダリとしての機能維持が必要である。（技術基準規則 第38条 原子炉制御室等及び第44条 原子炉格納施設）

このため、設計基準対象施設であるオペフロ BOP は、待機状態（閉状態）にて、基準地震動  $S_s$  により2次格納施設としてのバウンダリ機能を損なわないようにする必要があるが、その一方で、地震動により開放しないように設計する場合、本来の差圧による開放機能を阻害する可能性がある。この2つの要求機能を考慮した結果、2次格納施設のバウンダリ機能維持に対しては、オペフロ BOP の設置目的である差圧による開放機能を阻害しない範囲で耐震性を確保する設計とする。具体的には原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編（J E A G 4 6 0 1 ・補-1984）によれば、基準地震動  $S_2$ （ $S_s$  相当）と運転状態Ⅳ（設計基準事故）の組合せは不要であるが、基準地震動  $S_1$ （ $S_d$  相当）と運転状態Ⅳ（設計基準事故）の荷重の組合せは必要とされているため、オペフロ BOP は2次格納施設としてのバウンダリ機能を有するため、長期にわたり事象が継続した場合も考慮し、弾性設計用地震動  $S_d$  で開放しない設計とする。設計竜巻については、その最大気圧低下量がオペフロ BOP 開放の設計差圧より大きく、設計竜巻の気圧差により開放の可能性を否定できないが、設計竜巻の発生頻度は非常に小さく、設計基準事故との重畳は、判断基準の目安となる  $10^{-7}$  回/年を下回り十分小さいこと、プラント運転中又は停止中の設計竜巻を想定してもプラント停止及び冷却に必要な設備は確保でき原子炉安全に影響しない。このため、万一、地震や竜巻により開放し、安全上支障のない期間に復旧できず、2次格納施設としてのバウンダリ機能が維持できない場合には、安全な状態に移行（運転中は冷温停止へ移行、停止中は炉心変更時又は原子炉建屋原子炉区域で照射された燃料に係る作業の停止）することを保安規定に定める。

## 3. MS トンネル室 BOP の要求事項

### (1) 開放機能

MS トンネル室 BOP は、MSLBA を想定した場合の放出蒸気による圧力から原子炉建屋や原子炉格納容器等を防護するため、放出蒸気を建屋外に放出することを目的に設置されている。このため、主蒸気系トンネル室（以下、「MS トンネル室」という。）内外の差圧（設計圧力 9.81kPa 以下）により自動的に開放する機能が必要である。（技術基準規則 第12条 溢水等による損傷の防止）

設計基準対象施設である MS トンネル室 BOP は、待機状態（閉状態）にて、基準地震動  $S_s$  により開放機能を損なわないようにする必要があるため、基準地震動  $S_s$  に対する耐震健全性（建屋躯体の健全性）を確保する設計とする。



## (2) 2次格納施設のバウンダリ機能

MS トンネル室 BOP は、上記(1)の開放機能を満足させるため、原子炉区域の MS トンネル室に設置されており、原子炉区域の壁の一部となる MS トンネル室 BOP については、2次格納施設のバウンダリとしての機能維持が必要である。(技術基準規則 第38条 原子炉制御室等、第44条 原子炉格納施設及び第74条 運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)

このため、設計基準対象施設及び重大事故等対処設備である MS トンネル室 BOP は、待機状態(閉状態)にて、基準地震動  $S_s$  により2次格納施設としてのバウンダリ機能を損なわないようにする必要があるが、その一方で、地震動により開放しないように設計する場合、本来の差圧による開放機能を阻害する可能性がある。この2つの要求機能を考慮した結果、2次格納施設のバウンダリ機能維持に対しては、MS トンネル室 BOP の設置目的である差圧による開放機能を阻害しない範囲で耐震性を確保する設計とする。具体的には原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 (J E A G 4 6 0 1・補-1984) によれば、基準地震動  $S_2$

( $S_s$ 相当)と運転状態IV(設計基準事故)の組合せは不要であるが、基準地震動  $S_1$  ( $S_d$ 相当)と運転状態IV(設計基準事故)の荷重の組合せは必要とされているため、MS トンネル室 BOP は2次格納施設としてのバウンダリ機能を有するため、長期にわたり事象が継続した場合も考慮し、弾性設計用地震動  $S_d$  で開放しない設計とする。

## 4. オペフロ BOP 閉止装置の要求事項

### (1) 閉止機能

技術基準第74条(運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)の解釈では、「原子炉制御室の居住性を確保するために原子炉建屋に設置されたブローアウトパネルを閉止する必要がある場合は、容易かつ確実に閉止操作ができること。また、ブローアウトパネルは、現場において人力による操作が可能なものとする。」が要求されている。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機のオペフロ BOP は、開放後、炉心損傷に至る事故が発生した場合には、作業員の被ばく防止の観点から再閉止操作を行うことが困難であるため、技術基準第74条要求に適合させるためにオペフロ BOP 閉止装置を設置する。

このため、重大事故等対処設備であるオペフロ BOP 閉止装置は、待機状態(閉状態)にて、基準地震動  $S_s$  により閉止機能を損なわないようにする必要があるため、基準地震動  $S_s$  に対する耐震健全性を確保することが必要である。

### (2) 2次格納施設のバウンダリ機能

オペフロ BOP 閉止装置は、オペフロ BOP に代わって原子炉区域の壁の一部となることから、2次格納施設のバウンダリとしての機能(原子炉区域の気密性能確保)が必要である。

一方、オペフロ BOP 閉止装置の閉機能維持が必要な状況とは、基準地震動  $S_s$  により開放し、更に重大事故に至った場合である。技術基準第74条(運転員が原子炉制御室にとどまるための設備)では、7日間で100 mSv を超えないことが要求されており、7日間で想定する地震動は、設置許可基準規則第39条(地震による損傷の防止)で整理する SA 発生後の最大荷

重の組合せの考え方を踏まえ、オペフロ BOP 閉止装置が閉状態で組み合わせるべき地震動は弾性設計用地震動  $S_d$  であるが、長期の閉止機能維持を考慮して基準地震動  $S_s$  とする。

5. オペフロ BOP 強制開放装置（自主対策設備）への要求事項

オペフロ BOP 強制開放装置は、仮に、ISLOCA 発生時にオペフロ BOP4 枚のうち複数枚が開放せず、原子炉建屋内の環境改善を目的にブローアウトパネルを強制的に開放する必要が発生した場合に用いる自主対策設備であるため、強制開放装置の損傷が安全上重要な他設備に波及的影響を及ぼさないように構造強度を確保する必要がある。

6. ブローアウトパネル関連設備の要求機能

表 6 にブローアウトパネル関連設備に要求される機能の整理を示す。

表6 ブローアウトパネル関連設備に要求される機能の整理

ブローアウト パネル関連設 備	要求機能	設計基準対象施設			重大事故等対処設備		
		5条 地震	7条 竜巻 (差圧)	7条 竜巻 (飛来物)	50条 地震	54条 竜巻 (差圧)	54条 竜巻 (飛来物)
オペフロ BOP	開放機能 (MSLBA) (12条)	○ (S s)	○ プラント 停止にて 対応	○ プラント 停止にて 対応	—	—	—
	開放機能 (ISLOCA) (61条)	—	—	—	○ (S s)	—	—
	バウンダリ機能 (建屋気密性) (38条, 44 条)	○ (S d)	○ プラント 停止にて 対応	○ プラント 停止にて 対応	—	—	—
MS トンネル室 BOP	開放機能 (MSLBA) (12条)	○ (S s)	—	—	—	—	—
	バウンダリ機能 (建屋気密性) (38条, 44 条, 74条)	○ (S d)	—	—	○*1 (S d)	—	—
オペフロ BOP 閉止装置 (S A緩和設備)	閉止機能 (74条)	—	—	—	○ (S s)	○ (影響な し)	—*2
	バウンダリ機能 (閉止後) (74条)	—	—	—	○ (S s)	—*3	—*3
	バウンダリ機能 (閉止時) (74条)	—	—	—	○ (S s)	—*3	—*3

注記 \*1: S sでも閉維持が可能な実力を有する

\*2: オペフロ BOP 閉止装置は, S A緩和設備であるため共通要因故障としての考慮は不要

\*3: S A後の閉止状態での設計竜巻は, 事象の重ね合わせの頻度から組み合わせ不要

## ブローアウトパネルの配置と構造について

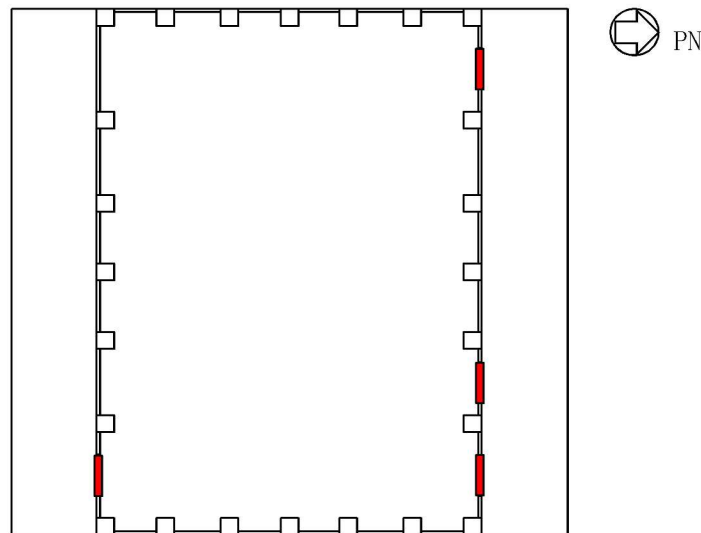
## 1. 燃料取替床ブローアウトパネルの配置について

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）は，原子炉建屋原子炉区域の外壁に合計 4 箇所設置する。

オペフロ BOP の配置について表 1-1 と図 1-1 に示す。

表 1-1 オペフロ BOP の配置について

設置階	配置	備考
原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床	南の壁面に 1 箇所，北の壁面に 3 箇所の合計 4 箇所	



原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床 概略平面図

■：（オペフロ BOP 4 枚）

図 1-1 オペフロ BOP 配置図

## 2. オペフロ BOP の構造について

オペフロ BOP は，厚さ約  $\square$  mm のクリップと呼ばれる装置 24 個で原子炉建屋原子炉区域外壁に設置されており，原子炉格納容器の設計上の最高使用外圧 14kPa に対し，3.43kPa 以下で開放するように設計されている。パネル寸法と現状のクリップ数を表 2-1 に，構造概要を図 2-1 に示す。

現在，クリップはパネル 1 枚あたり 24 個が設置されているが，新規制基準対応として，確実に設計圧力で開放させる観点からクリップ形状，数を最適化し，クリップはオペフロ BOP 1 枚あたり 18 個（幅約 37.5mm を  $\square$  個，幅約 75mm を  $\square$  個）とする。

オペフロ BOP は，このクリップだけで建屋躯体側の枠材に固定され，パネル下部には，パネル移動時（開放時）の摩擦による抗力を低減するためのすべり台が設置されている。また，パネル

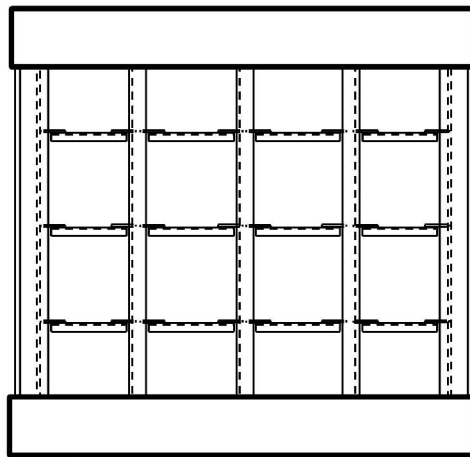
と躯体の間隙にはパッキンが設置され、原子炉建屋原子炉区域の2次格納施設としてのバウンダリ機能を確保する設計としている。

オペフロ BOP は、内圧によりパネル本体が外側に押され、このクリップが外れ、更に内圧により外側に押されて開放する構造であり、オペフロ BOP は、電源や空気源に頼ることなく、静的、かつ圧力上昇に対して確実に開放できる仕組みとして、クリップ構造が採用されており、この開放機構は、既設系統設備でも採用実績のある破壊板（ラプチャーディスク）と同様の考え方（差圧により部材を破壊）であり、構造が単純であることから、信頼性が高いものである。

表 2-1 オペフロ BOP の主要仕様

設置場所		寸法	材質	クリップ数
4 階 中間床	北 3, 南 1	4160 mm×4260 mm	SS400	18 個 (24 個)

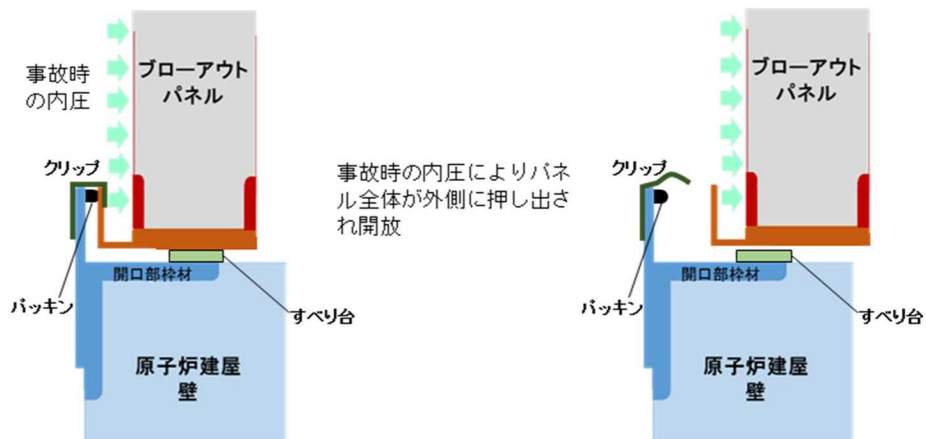
クリップ数の ( ) 個数は、変更前の個数



○：幅約75.0mmのクリップ

○：幅約37.5mmのクリップ

○：新規制基準対応としてクリップ形状等を最適化した後のクリップ位置



断面図（クリップ式構造の概念図）

図 2-1 オペフロ BOP の構造と作動原理

### 3. オペフロ BOP が開放するための条件の整理

建屋内圧力によるクリップの変形及びパネルの開放時の具体的な流れを図 3-1 に示す。パネルを規定差圧で開放させるためには、パネルの開放に対する抗力（下記①～③）を規定差圧による開放荷重より小さく設定する必要がある。また、オペフロ BOP への要求機能（2 次格納施設としてのバウンダリ機能）から、弾性設計用地震動 S d では開放しない設計とする必要がある。

以上より、オペフロ BOP に要求される機能を満たすための条件は以下のとおりであり、本条件を満足するように設計する。

$$\begin{array}{ccccc} \text{弾性設計用地震動 S d} < & \text{パネルの開放に必要な荷重} < & \text{建屋内圧力による荷重} \\ \text{(5)} & \text{(パネル開放時の抗力)} & \text{(4)} \\ & \text{(1+2+3)} & \end{array}$$

ここで、

#### ① クリップを変形させる荷重×クリップ個数

- ・ クリップを変形させるための荷重はクリップ試験の結果を踏まえて保守的に設定
- ・ クリップ個数は弾性設計用地震動 S d、クリップ試験結果を踏まえて設定

#### ② パネルとすべり台部の摩擦力

- ・ パネルと躯体の摩擦力を低減させるため、パネル及び躯体にステンレス製のすべり台を 2 箇所設置
- ・ すべり台間の摩擦係数

#### ③ シール材\*の破断に必要な荷重（シール材メーカーカタログ値より保守的に設定）

注記 \*：雨水等の侵入を防ぐため、上部及び側面にシール材（シリコンシーラント）が塗布されている。

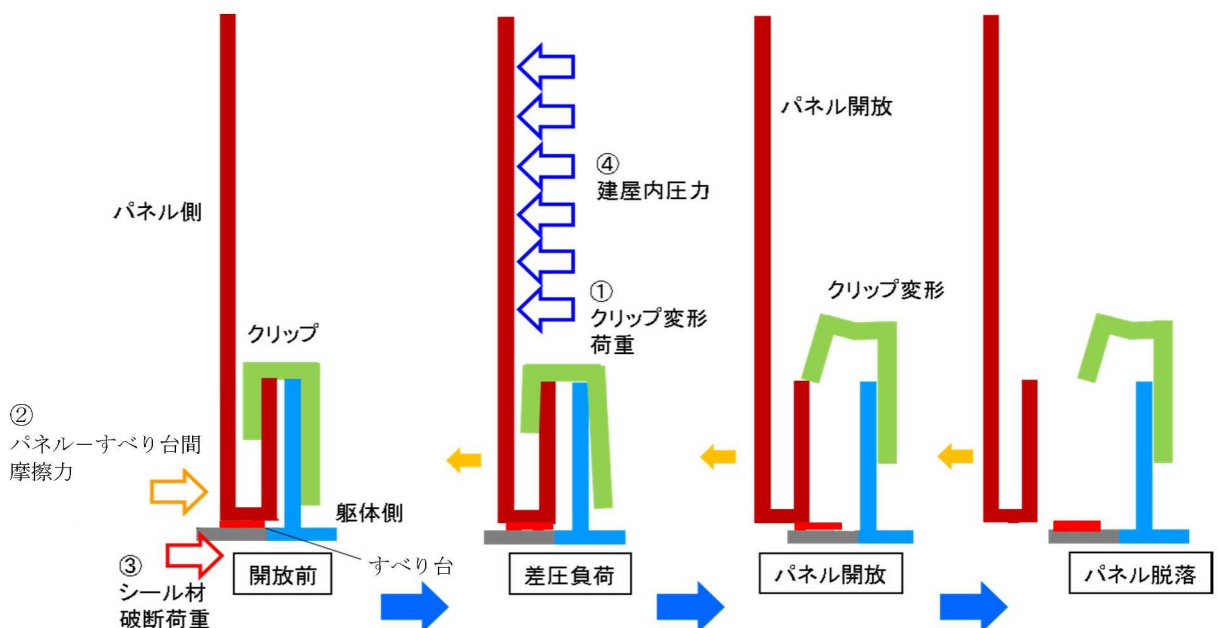


図 3-1 オペフロ BOP 開放のメカニズム



4. オペフロ BOP の開放の検知について

オペフロ BOP の開放を検知し，プラント停止や燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置による開口部の閉止等の対応措置を速やかに実施するため，個々のオペフロ BOP の開放を検知するリミットスイッチを設置し，中央制御室で状態を把握可能な設計とする。

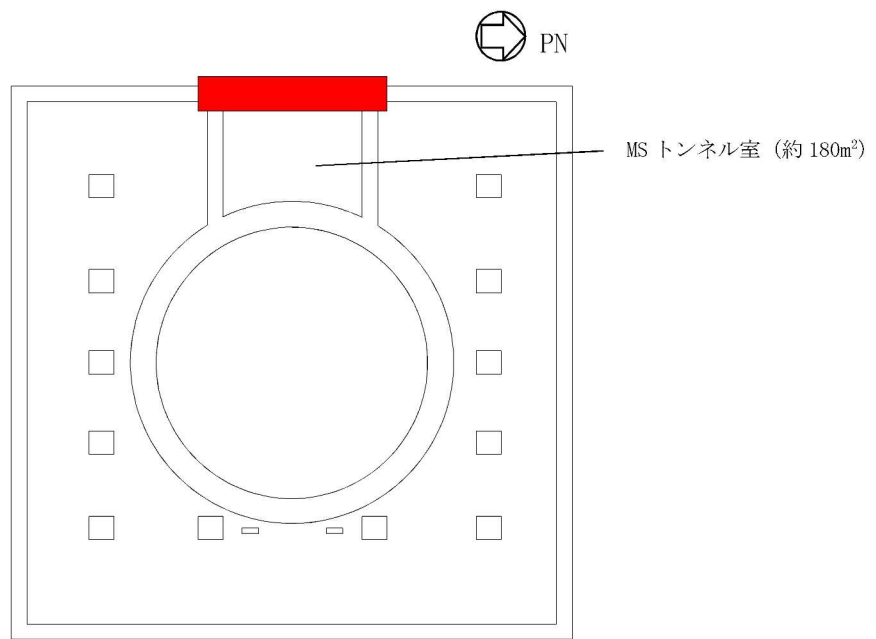
5. 主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの配置について

主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下 MS トンネル室 BOP という。）は，主蒸気系トンネル室（以下 MS トンネル室という。）のタービン建屋側との境界壁に合計 79 箇所設置する。

MS トンネル室 BOP の配置について表 5-1 と図 5-1 に示す。

表 5-1 MS トンネル室 BOP の配置について

設置階	配置	備考
原子炉建屋原子炉区域地上 1 階	壁面に 79 箇所	



原子炉建屋原子炉区域地上 1 階 概略平面図

■ : MS トンネル室 BOP 79 枚

図 5-1 MS トンネル室 BOP 配置図

6. MS トンネル室 BOP の構造について

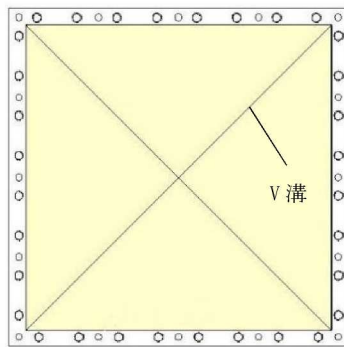
MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルで MS トンネル室のタービン建屋側との境界壁に設置されており、原子炉格納容器の設計上の最高使用外圧 14kPa に対し、5.89kPa 以上、9.81kPa 以下で開放するように設計されている。パネル寸法とパネル数を表 6-1 に、構造概要を図 6-1 に示す。

MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルと枠部で建屋躯体に固定されている。また、原子炉建屋原子炉区域の 2 次格納施設としてのバウンダリ機能を確保する設計としている。

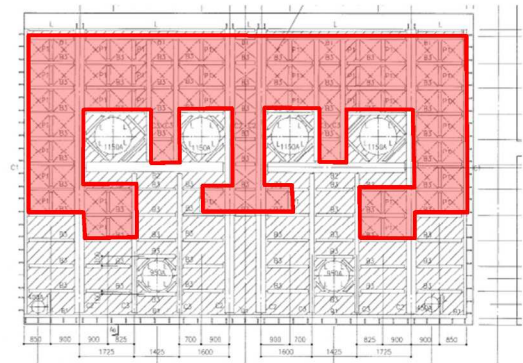
MS トンネル室 BOP は、内圧によりパネル本体が外側に押され、ラプチャーパネルに設置されている V 溝からパネルが開放し、最終的に完全に開放する構造である。

表 6-1 MS トンネル室 BOP の主要仕様

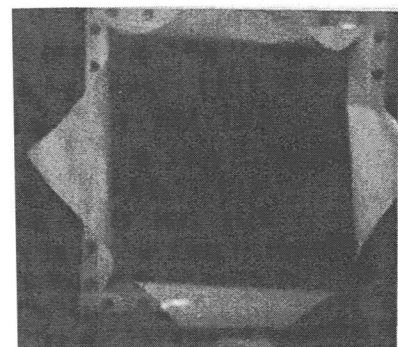
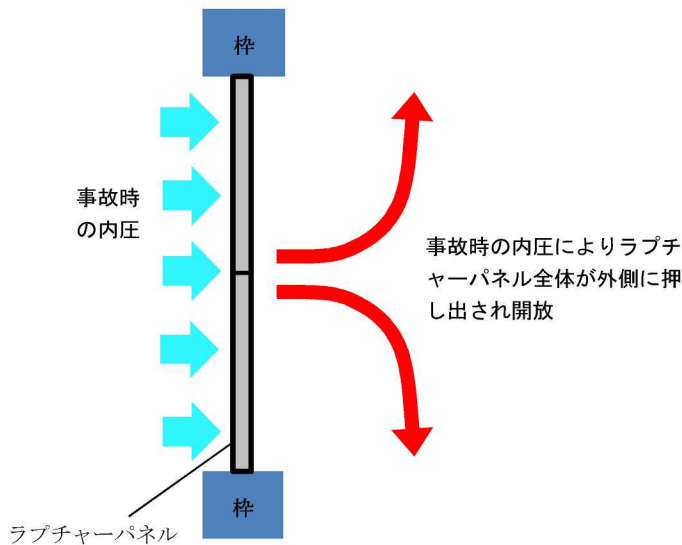
設置場所		寸法	材質
1 階	西 79	780 mm×780 mm	A1050P



ラプチャーパネル



■ : MS トンネル室 BOP  
MS トンネル室 立面図



ラプチャーパネルの開放後

図 6-1 MS トンネル室 BOP の構造と作動原理



## 7. MS トンネル室 BOP の開放について

MS トンネル室 BOP はラブチャーパネルを採用しており、専用の動力を必要とせず、受圧面に規定の圧力が加われば破裂し開放する。主蒸気管が破断した場合には、原子炉建屋原子炉区域主蒸気系トンネル室内に蒸気が噴出し規定の圧力が加わったラブチャーパネルから破裂・開放していくことになる。

仮に、事象の初期（蒸気が伝播しラブチャーパネルに初めて到達する段階）に全数のラブチャーパネルが破裂・開放しなかったとしても、その後の蒸気の継続的供給により、室内の圧力が上昇し受圧面に規定の圧力が加われば、未開放ラブチャーパネルが破裂することになる。また、事象の規模が小さく全数のラブチャーパネルが破損せず、かつ、主蒸気系トンネル室内の圧力が規定の開放圧力まで上昇しなければ、それ以上のラブチャーパネルの破裂・開放は発生しない。

設計基準事故の事故解析（環境への放射性物質の異常な放出）で対象としている主蒸気管破断事故においては、主蒸気管 1 ラインの破断を考慮しており、主蒸気隔離弁完全閉止までは、室内に蒸気は供給され続ける。仮に、未開放のラブチャーパネルがあったとしても、その後の圧力上昇により未開放の状態を維持することは困難である。

## 竜巻防護ネットによる流路への影響について

## 1. 目的

K7 オペフロ BOP 内側には、竜巻による飛来物の侵入を防ぐことを目的として、竜巻防護ネットを設置している。本資料では、竜巻防護ネットの設置により、主蒸気管破断事故時の蒸気排出及びインターフェイスシステム LOCA（以下「IS-LOCA」という。）時の建屋内換気への影響を評価する。

## 2. 評価の方針

オペフロ BOP での圧力損失と竜巻防護ネットによる圧力損失を比較し、竜巻防護ネットによる圧力損失が十分に小さいことを確認することで、竜巻防護ネットによる影響が有意でないことを確認する。

## 3. 評価に関連する設備の概要

## 3.1 オペフロ BOP 及び竜巻防護ネットの位置関係

竜巻防護ネットは、図 3-1 に示す通り、オペフロ BOP の内側に支持構造物により支持されており、主蒸気管破断事故時、IS-LOCA 時の蒸气流路の一部となる。

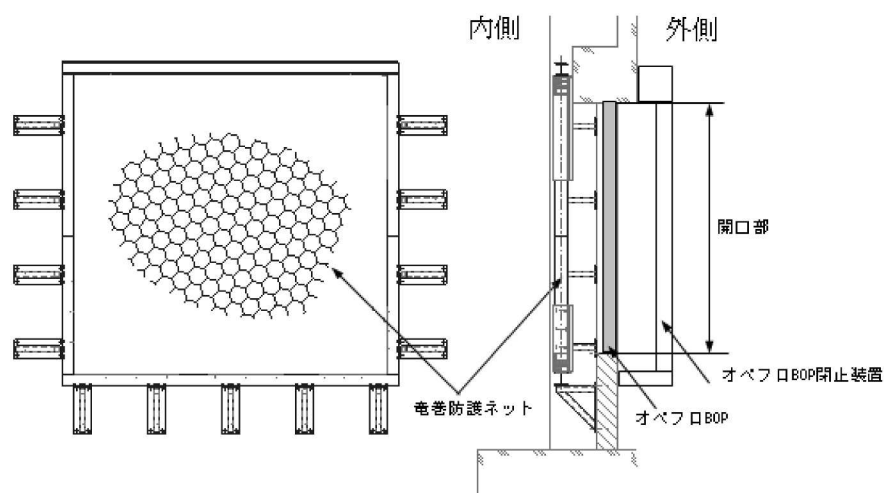


図 3-1 オペフロ BOP と竜巻防護ネットの概要

## 3.2 オペフロ BOP の開口面積

オペフロ BOP の開口面積 ( $S_1$ ) は、 $15.2\text{m}^2$ （縦  $3.8\text{m}$ ×横  $4.0\text{m}$ ）である（図 3-2 参照）。

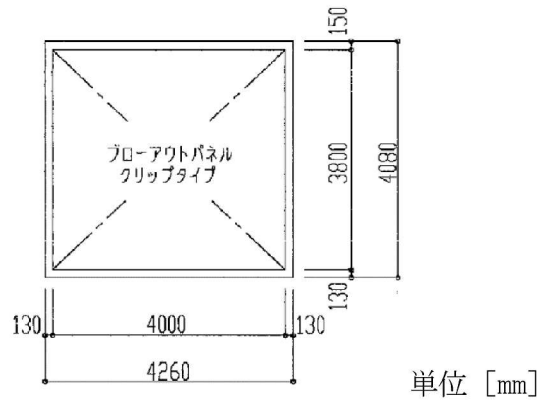


図 3-2 オペフロ BOP の寸法

### 3.3 竜巻防護ネット通過時の流路面積

竜巻防護ネットとオペフロ BOP との間には、約 0.4m の隙間がある。ネットは一面にのみ張っており、側面は開口となっている（図 3-3 参照）。

竜巻防護ネットのネット部及び側面部を足し合わせ、面積を求めると約 21.9m<sup>2</sup>となる。なお、算出にあたっては、竜巻防護ネットの支持構造物の流路上の投影面積を除いている。

(参考) 竜巻防護ネット（ネット部）  $S_2$  : 約 17.3m<sup>2</sup>

竜巻防護ネット（側面部）  $S_3$  : 約 5.2m<sup>2</sup>

支持構造物 : 約 0.6m<sup>2</sup>

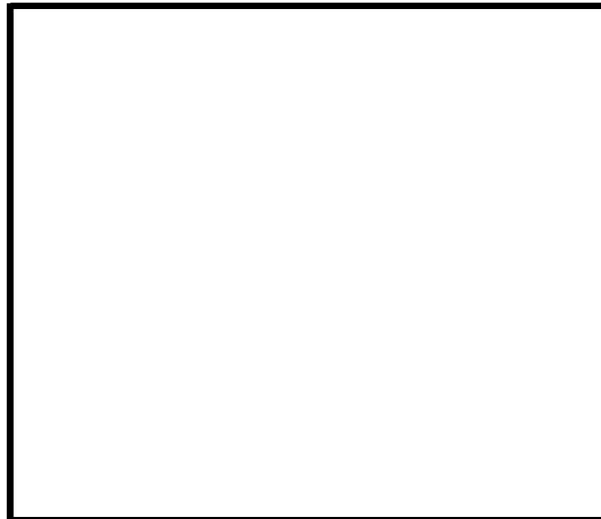


図 3-3 竜巻防護ネット

### 3.4 竜巻防護ネット（ネット部）の開口率

竜巻防護ネット（ネット部）の開口率は1枚当たり  であり、このネットが二枚重ねで張られている。

#### 4. 影響評価

##### 4.1 オペフロ BOP 通過時の圧損係数

オペフロ BOP を蒸気が通過する際には、流路は急縮小し、その後急拡大するため、Handbook of Hydraulic Resistance<sup>(1)</sup>に示されているオリフィスの実験相関式が適用できると考えられる。

図 4-1 に示すオリフィスの実験相関式を用いてオペフロ BOP における圧損係数を算出した結果、オペフロ BOP 単独での蒸気通過時の圧損係数 ( $\zeta_1$ ) は、となる。

$$\zeta = 0.5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0.75} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)^2 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1}\right)^{0.375} \left(1 - \frac{F_0}{F_2}\right)$$

$$\tau = (2.4 - \bar{l}) \times 10^{-\phi(\bar{l})} \geq 0, \quad \bar{l} = \frac{l}{D_h}, \quad \phi(\bar{l}) = 0.25 + \frac{0.535 \bar{l}^8}{0.05 + \bar{l}^8}$$

$$D_h = \sqrt{F_0}$$

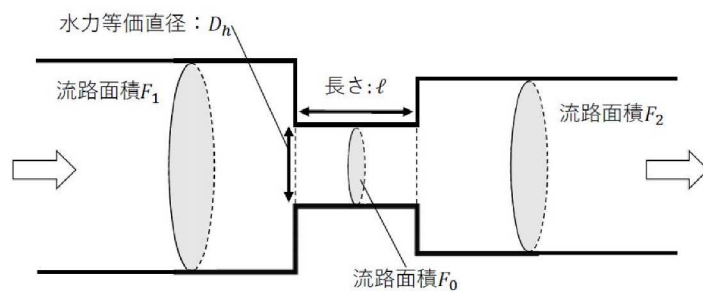


図 4-1 オリフィスの実験相関式中に用いるパラメータの関係図

##### 4.2 竜巻防護ネット通過時の圧損係数

竜巻防護ネット通過時の圧損係数は、Handbook of Hydraulic Resistance<sup>(1)</sup>に示されている金属製棒状素線によるネット構造の圧損係数計算式を参照し算出する（図4-2，図4-3参照）。

$$Re = \frac{w_0 \delta_m}{\nu} \geq 10^3$$

$$\zeta_{wir} \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2 / 2}$$

$$= 1.3(1 - \bar{f}) + \left(\frac{1}{\bar{f}} - 1\right)^2$$

$$\bar{f} = \frac{F_0}{F_1}$$

図 4-2 金属製棒状素線によるネット構造の圧損係数計算式

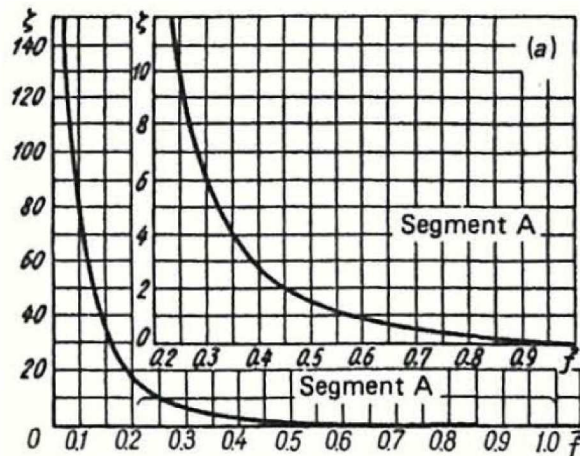


図 4-3 金属製棒状素線によるネット構造の開口率と圧損係数の関係

(1) 竜巻防護ネット（ネット部）

竜巻防護ネットの開口率は  であり, 図 4-2 の式に当てはめて算出すると, 圧損係数は,  となる。竜巻防護ネットは二枚重ねで張られていることから, 竜巻防護ネット（ネット部）通過時の圧損係数（ $\zeta_2$ ）は  となる。

(2) 竜巻防護ネット（側面部）

竜巻防護ネットの側面部にはネットが張られておらず開口部となっている。本評価では, 保守的にネットとみなし, 開口部を占有している支持構造物の投影面積から開口率を求め, 図 4-2 の式に当てはめ圧損係数を算出した結果, 竜巻防護ネット（側面部）通過時の圧損係数（ $\zeta_3$ ）は  となる。

4.3 オペフロ BOP 及び竜巻防護ネット通過時の流速

オペフロ BOP, 竜巻防護ネット（ネット部）及び竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比を求める。

$V_1$  : オペフロ BOP 通過時の流速

$V_2$  : 竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速

$V_3$  : 竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速

竜巻防護ネット（ネット部）を通過する圧力損失と竜巻防護ネット（側面部）を通過する圧力損失は等しくなるため, 以下の式が成り立つ。

$$\zeta_2 \times V_2^2 = \zeta_3 \times V_3^2$$

したがって, 竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速を 1 とした場合の竜巻防護ネット（ネット部）と竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比は,

$$V_2 : V_3 = 1 : \text{} \text{ となる。}$$

以上より、竜巻防護ネット（ネット部）通過時の流速を 1 とした場合のオペフロ BOP、竜巻防護ネット（ネット部）及び竜巻防護ネット（側面部）通過時の流速比は、

$$V_1 = (V_2 \times S_2 + V_3 \times S_3) / S_1 \text{ より、}$$
$$V_1 : V_2 : V_3 = \boxed{\quad} : 1 : \boxed{\quad} \text{ となる。}$$

#### 4.4 オペフロ BOP と竜巻防護ネットの圧力損失比

圧力損失は、圧損係数と流量の 2 乗の積で求まることから、以下の式が成り立つ。

$$\text{圧力損失比} = (\zeta_2 \times V_2^2) / (\zeta_1 \times V_1^2)$$

上記の計算式を求めると、圧力損失比は約 0.07 となり、オペフロ BOP 単独での通過時の圧力損失に対して竜巻防護ネット通過時の圧力損失の影響は 7%程度となる。

#### 5. まとめ

竜巻防護ネット設置による影響評価を実施した。竜巻ネットを設置した場合の主蒸気管破断時の流速での圧力損失は、従来（設置前）と比較しても 7%程度の増加であることが確認された。主蒸気管破断事故は、数秒で建屋内圧力が上昇し BOP 開放とともに、さらに数秒で圧力が大気圧に静定する事象である。ネット設置により圧力の最大値と大気圧に静定するまでの時間が若干増加することが考えられるが、7%程度の圧力損失の上昇であれば、事故時の挙動に有意な変化をもたらすものではないと考えられる。

また、IS-LOCA 時の流速は主蒸気管破断時の流速より小さいため、主蒸気管破断時と比較し、さらに圧力損失が小さくなる結果となると考えられ、換気的能力に与える影響は小さいと考えられる。

#### 6. 参考文献

- (1) I.E. Idelchik, Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, Jaico Publishing House.

## IS-LOCA 時の MS トンネル室 BOP への影響について

## 1. 目的

IS-LOCA により建屋内の圧力が上昇した際の MS トンネル室 BOP への影響（開放の有無）を確認する。

## 2. IS-LOCA 時の蒸気伝播の流れ

IS-LOCA 時の蒸気伝播の流れを示した概略図を示す（図 2-1）。IS-LOCA 発生時には、高圧炉心注水系（HPCF）ポンプ室から放出された蒸気が機器ハッチ等の開口部を經由し、建屋内の各フロアの圧力が上昇する。R/B 4F の圧力がオペフロ BOP 開放設定圧力に達すると、オペフロ BOP が開放し蒸気が環境中に放出されることにより、建屋内の圧力は低下する。

各フロアの圧力は、配管破断箇所から下流にいくにつれ、流路の圧損による影響から低くなっていく。また、オペフロ BOP 開放後には、蒸気が環境中に放出されるため、オペフロ BOP が開放する直前で MS トンネル室の圧力は最大になると考えられる。

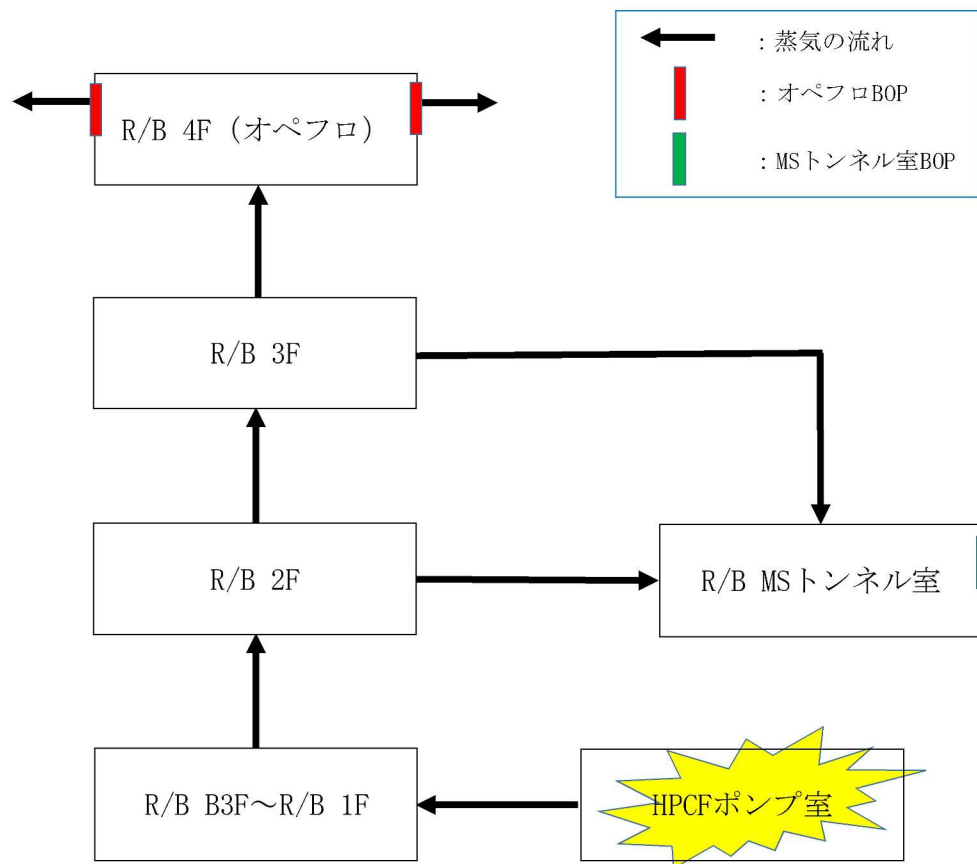


図 2-1 IS-LOCA 時における蒸気伝播の概略図



### 3. 評価の方針

IS-LOCA 時に MS トンネル BOP に加わる圧力と MS トンネル室 BOP の開放設定圧力を比較し、IS-LOCA 時に MS トンネル室に加わる圧力が MS トンネル室 BOP の開放設定圧力を上回らないことを確認する。なお、R/B MS トンネル室の R/B 2F, R/B 3F と接する面にも、ブローアウトパネルが設置されているが、原子炉建屋のバウンダリではないため、ここでは考慮せずに評価を行う。

IS-LOCA 時に MS トンネル BOP に加わる圧力は、R/B 3F での圧力から R/B MS トンネル室までの流路圧損（図 3-1 中の  $\Delta P_3$ ）を差し引いた値、あるいは、R/B 2F での圧力から R/B MS トンネル室までの流路圧損（図 3-1 中の  $\Delta P_4$ ）を差し引いた値のどちらか大きい方の値になると考えられるが、本評価では、保守的に  $\Delta P_3$  及び  $\Delta P_4$  の圧力低下に期待せず、MS トンネル室と隣接し、かつ、より上流のフロアである R/B 2F における圧力と同等とみなす。

R/B 2F における圧力の最大値は、オペフロ BOP の開放設定圧力に R/B 2F から R/B 4F までの流路の圧損（図 3-1 中の  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ）を加えた値になるため、この値が MS トンネル室 BOP の開放設定圧力に到達しないことを確認する。なお、IS-LOCA により放出された蒸気は各フロアで分岐や蒸気凝縮等により、破断点より放出された蒸気流量より小さくなると考えられるが、本評価では、保守的に破断点から放出された蒸気流量の全量が R/B 2F から R/B 4F にかけて流れることを想定する。その際の蒸気流量としては、設置許可時の IS-LOCA の条件を参考にし、破断時に発生する流量の時刻歴における最大値を用いて流路の圧損（ $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ）を算出する。なお、蒸気流量に換算する際には、保守的に密度を小さくするために 100°C, 1 気圧における蒸気密度を用いる。

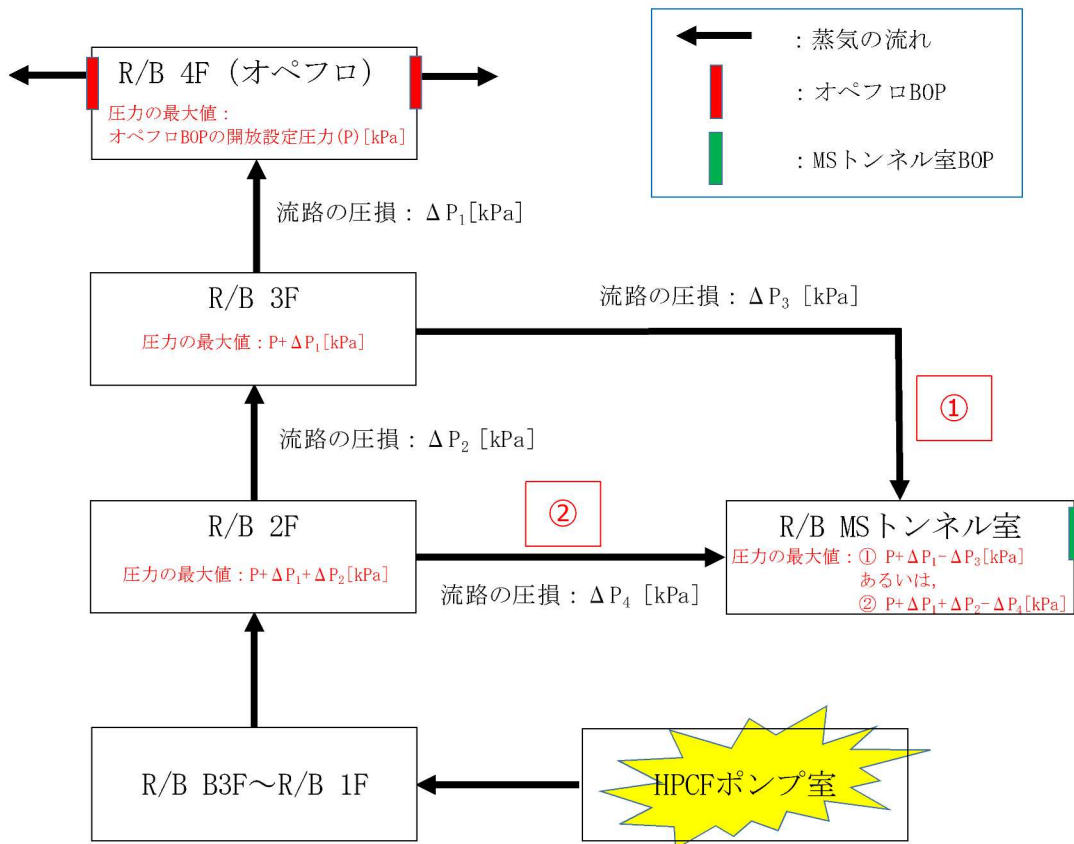


図 3-1 IS-LOCA 時における蒸気伝播の概略図（説明付）



#### 4. 評価条件

##### 4.1 オペフロ BOP の開放設定圧力

オペフロ BOP は、内外圧差が 3.43kPa 以下で開放する設計となっている。オペフロ BOP の開放試験では、～ kPa で開放する結果を得られているが、本検討では、保守的に MS トンネル室 BOP に加わる圧力が高くなるよう、開放設定圧力を 3.43kPa として評価を行う。

##### 4.2 MS トンネル室 BOP の開放設定圧力

MS トンネル室 BOP は、ラプチャーパネルを採用している。MS トンネル室 BOP の開放設定圧力としては、設計における開放設定圧力 (800kg/m<sup>2</sup>±200kg/m<sup>2</sup>) より、保守的に開放しやすい条件となるよう下限値である 600kg/m<sup>2</sup> (5.89kPa) と設定する。

##### 4.3 流路の圧損係数

###### 4.3.1 R/B 3F～R/B 4F (オペフロ) 通過時における圧損係数 (ζ)

式 (1) に示すオリフィスの実験相関式を用いて R/B 3F～R/B 4F 通過時における圧損係数を算出した。

$$\zeta = 0.5 \left( 1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0.75} + \left( 1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \left( 1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0.375} \left( 1 - \frac{F_0}{F_2} \right)$$

$$\tau = (2.4 - \bar{l}) \times 10^{-\phi(\bar{l})} \geq 0, \quad \bar{l} = \frac{l}{D_h}, \quad \phi(\bar{l}) = 0.25 + \frac{0.535 \bar{l}^8}{0.05 + \bar{l}^8} \quad (1)$$

$$D_h = \sqrt{F_0}$$

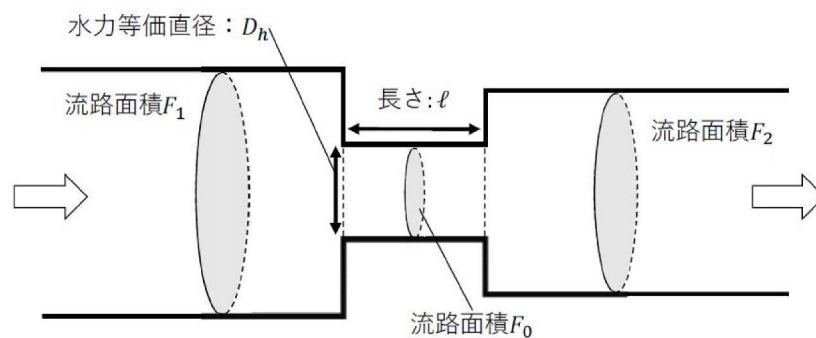


図 4-1 オリフィスの概念図

$F_0$  は、R/B 3F と R/B 4F 間の流路となる機器ハッチの開口面積 (44m<sup>2</sup>) を設定する。また、保守的に圧損係数が大きくなるよう、 $F_1$ ,  $F_2$  は無限大とし、 $l$  は 0m として算出する。

以上より、R/B 3F～R/B 4F 通過時の圧損係数は、2.9 となる。

#### 4.3.2 R/B 2F～R/B 3Fにおける圧損係数（ $\zeta_2$ ）

4.3.1 同様に、オリフィスの実験相関式を用いて R/B 2F～R/B 3F における圧損係数を算出した。

$F_0$  は、R/B 2F と R/B 3F 間の流路となる機器ハッチの開口面積（44m<sup>2</sup>）を設定する。また、保守的に圧損係数が大きくなるよう、 $F_1$ 、 $F_2$  は無限大とし、 $l$  は 0m として算出する。

以上より、R/B 2F～R/B 3F 通過時の圧損係数は、2.9 となる。

#### 4.4 評価条件まとめ

表 4-1 評価条件まとめ

分類	項目	記号	値	単位	備考
BOP 設定圧力	オペフロ BOP 開設定圧力		3.43	kPa	設計値
	MS トンネル室 BOP 開設定圧力		5.89	kPa	下限値で設定
R/B 3F～R/B 4F	流路面積	$A_1$	44	m <sup>2</sup>	
	圧損係数	$\zeta_1$	2.9		
	蒸気流速	$V_1$	2.0	m/s	$V_1=W/\rho/A_1$
R/B 2F～R/B 3F	流路面積	$A_2$	44	m <sup>2</sup>	
	圧損係数	$\zeta_2$	2.9		
	蒸気流速	$V_2$	2.0	m/s	$V_2=W/\rho/A_2$
蒸気流量	最大蒸気流量	$W$	50	kg/s	設置許可時の IS-LOCA の条件を参考にし、保守的に 50kg/s と設定
蒸気条件	蒸気温度		100	°C	保守的に 100°C と設定
	蒸気密度計算用 圧力		101325	Pa	保守的に 1 気圧と設定
	蒸気密度	$\rho$	0.597578	kg/m <sup>3</sup>	

#### 5. 影響評価

IS-LOCA 時の R/B 2F における最大の圧力は、以下の式により求められる。

$$\text{R/B 2F における圧力 [kPa]} = \text{オペフロ BOP 開放設定圧力} + \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$\Delta P_1$  : R/B 3F～R/B 4F 通過時に生じる圧損

$\Delta P_2$  : R/B 2F～R/B 3F 通過時に生じる圧損

$$\Delta P_1 = (\zeta_1 \times \rho \times V_1^2) / 2$$

$$\approx 0.004 \text{ kPa}$$

$$\Delta P_2 = (\zeta_2 \times \rho \times V_2^2) / 2$$

$$\approx 0.004 \text{ kPa}$$

したがって、R/B 2F における圧力は、3.44kPa 程度となり、MS トンネル室 BOP の開放設定圧力 (5.89kPa) を上回らないことから、IS-LOCA 時に MS トンネル室 BOP は開放しない。

## クリップ引張試験について

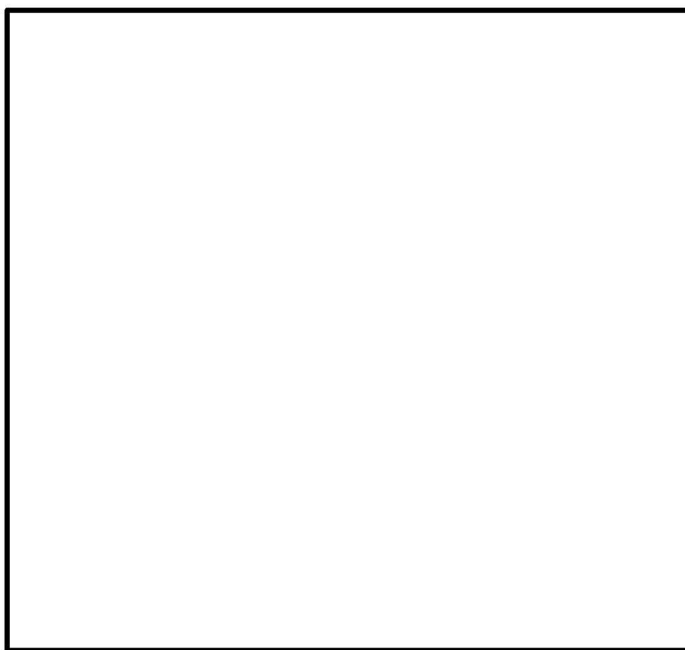
## 1. 目的

クリップは燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）を建屋躯体に固定するとともに、オペフロ BOP の開放圧力を決定する主要な部品である。このため、設計差圧（3.43 kPa）以下でパネルが確実に開放し、弾性設計用地震動  $S_d$  では開放しないことを設計上担保するため、クリップ単体での開放試験を実施する。

## 2. 試験方法

試験は、クリップ取付部を模擬した鋼材に試験体としてのクリップを取り付け、引張試験機にて鋼材を引っ張ることにより、クリップに付加される荷重、変位、ひずみ等を測定した。図 2-1 にクリップの引張試験概要図を示す。試験条件は以下のとおり。

- ・引張試験機：オートグラフ試験機
- ・制御方式：変位制御（引張速度 2 mm/min）



- ◆ 引張試験内容  
クリップ単体を引張試験にてパネルの水平方向の荷重を模擬する
- 【測定項目】
  - ①試験荷重
  - ②クリップ変位
  - ③クリップのひずみ
- 【測定結果の評価】  
クリップの最大荷重と変位の試験結果より、クリップの作動時におけるばらつきを検証する  
パネルが設定差圧にて確実に開放するための管理項目を検証する
- 【クリップの管理項目】
  - ①材質
  - ②形状
  - ③クリップの寸法（板厚、幅）
  - ④取付方法と取付寸法



図 2-1 クリップの引張試験概要図

### 3. 試験結果

#### (1) 基本試験での試験体仕様

オペフロ BOP を躯体に固定しているクリップの特性を把握し、クリップ数を確定させるため、実際に使用するクリップ単体の開放試験を実施した。クリップは2種類（幅約 75mm、及び約 37.5mm）あり、それぞれに対して開放試験を実施した。各項目の試験目的と具体的な仕様を表 3-1、試験用クリップ形状を図 3-1、試験体寸法測定箇所を図 3-2、試験用クリップ一覧を表 3-2 に示す。

表 3-1 試験確認項目、目的と具体的な仕様

項目	目的	具体的な仕様
材質	—	SUS304
板厚	—	
幅 (a)	クリップ幅と強度の関係確認	約 75 mm / 約 37.5 mm
掛り寸法 (c)	—	
曲げ加工後のクリップ幅 (b)	—	65.6 mm

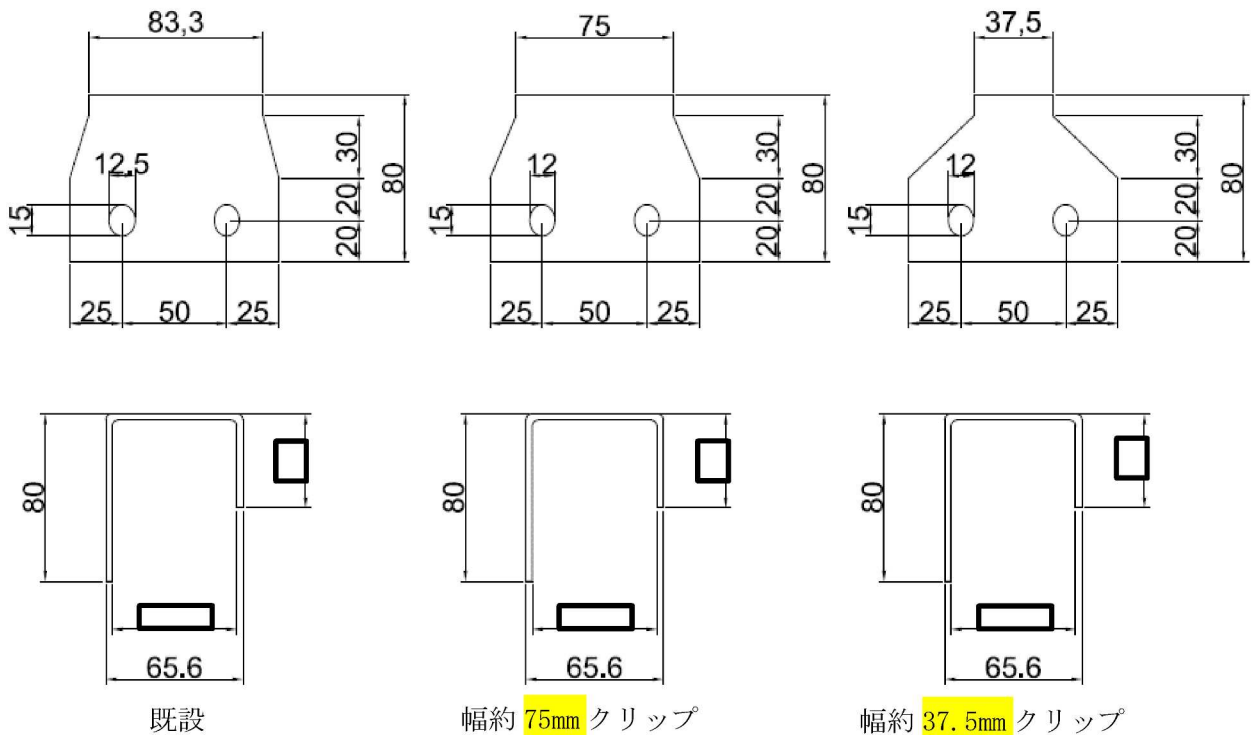


図 3-1 試験用クリップ形状(正面図・断面図)

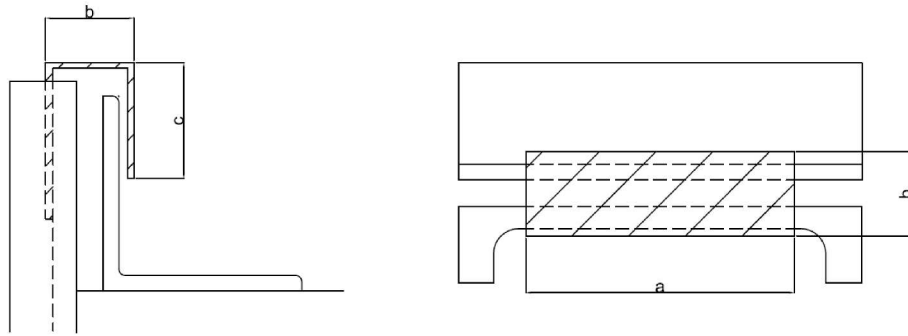
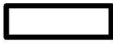



図 3-2 試験体寸法測定箇所

表 3-2 試験用クリップ一覧

試験体 NO	材質	板厚	幅 (a)	掛り寸 法 (c)	曲げ加工 後幅 (b)	形状	変位 速度	試験 体数
試験体 1	SUS304*1		約 75 mm		65.6 mm	既設と 同じ	2 mm/分	3
試験体 2			約 37.5 mm					3

注記 \*1: オーステナイト系ステンレス鋼

(2) 試験結果及び考察

試験結果を表 3-3 に、クリップの荷重・変位の関係を図 3-3 に示す。

クリップ幅約 75 mm の最大耐力の平均値は 1807 N、標準偏差  $\sigma$  は 4 N であった。また、クリップ幅約 37.5 mm の最大耐力の平均値は 1156 N、標準偏差  $\sigma$  は 38 N であった。なお、標準偏差については

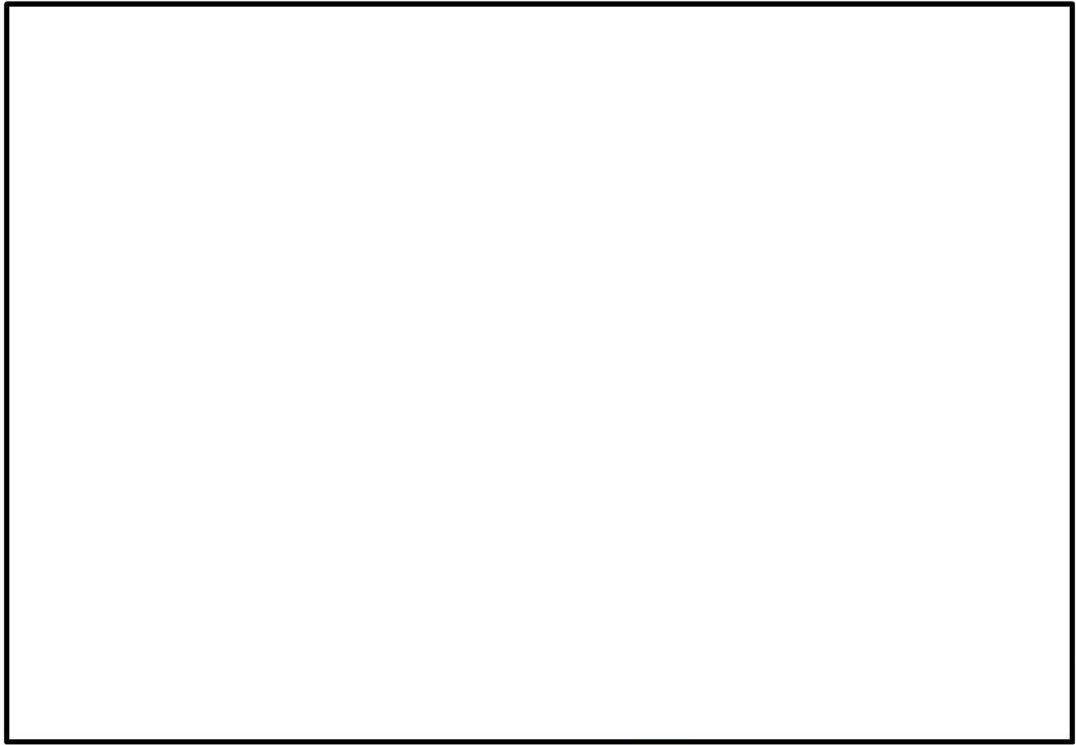
$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

s: 標準偏差、n: 試験回数、 $x_i$ : 試験データ、 $\bar{x}$ : 試験データの平均値により算定した。

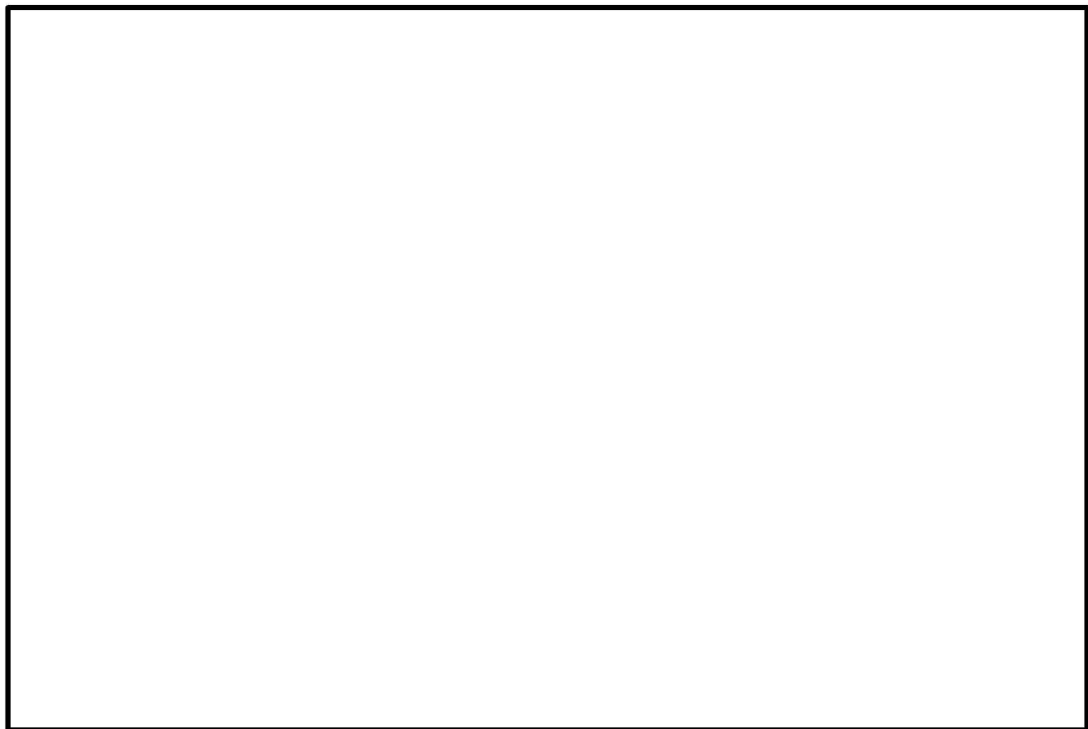
クリップ数の決定にあたっては、弾性設計用地震動 S d による地震荷重で開放しない必要があることから、クリップ 1 個が開放するための必要荷重は、保守的に標準偏差の 3 倍を見込み、1 個当たり、クリップ幅約 75 mm で 1795 N、クリップ幅約 37.5 mm で 1042 N として考慮する。また、クリップは約  引張られるとクリップ取付部から外れる（クリップは開放の抵抗とならない）ことを確認した。

表 3-3 実機用クリップ試験結果

耐力 (試験体数は3個)		クリップ幅約75mm	クリップ幅約37.5mm
		荷重 (N)	
最大耐力	平均値	1807	1156
	最大値	1812	1206
	最小値	1803	1115
標準偏差 $\sigma$		4	38
最大耐力 (平均) + 3 $\sigma$		1819	1270
最小耐力 (平均) - 3 $\sigma$		1795	1042



(a) クリップ幅約 75mm



(b) クリップ幅約 37.5mm

図 3-3 クリップの荷重・変位の関係



## ブローアウトパネルの開放機能を担保する設計条件について

## 1. 燃料取替床ブローアウトパネル

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）の満たすべき開放条件について整理した。オペフロ BOP を開放させるために満足すべき条件は以下の通りであり，抵抗力（②クリップの抗力，③パネル移動時の摩擦力による抗力，④パネルと躯体間のシール材の抗力の合計）が，⑤差圧による荷重以下（3.43kPa 以下）の条件を満足する必要がある。また，2次格納施設としての原子炉建屋原子炉区域のバウンダリ機能確保の観点から，①弾性設計用地震動 S d で開放しないように設計する。

$$\boxed{\text{①弾性設計用地震動 S d による開放荷重}} < \boxed{\text{抵抗力 (②クリップの抗力+③摩擦による抗力+④シール材抗力)}} < \boxed{\text{⑤設計差圧 3.43kPa による開放荷重}}$$

各項目の考え方，根拠は以下のとおり。

## (1) 基本パラメータ・条件

オペフロ BOP の重量は，1500 kg として評価する。

弾性設計用地震動 S d の加速度は，ブローアウトパネル設置位置より高く，地震加速度が大きい原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床（T. M. S. L. 49.7 m）での設計用床応答曲線（S d）より得られる応答水平震度 1.3G を用いて評価する。

## (2) 設計差圧 3.43 kPa 時の開放荷重（⑤）

設計差圧以下でパネルを開放させるため，設計差圧 3.43kPa とする。オペフロ BOP に 3.43kPa が付加する場合の荷重として約 52.2 kN と評価する。

## (3) 弾性設計用地震動 S d による開放荷重（①）

弾性設計用地震動 S d による地震力としては，約 19.2kN（ $1500 \text{ kg} \times 1.3\text{G} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 19110 \text{ N}$ ）とする。なお，オペフロ BOP の固有振動数は，実機大モックアップ試験装置で固有振動数を測定しており，1次固有振動数は約  Hz である。このため，設計用床応答曲線（S d）を用いて地震力を算出する。

## (4) クリップの個数と配置（②下限側）

クリップの抗力算定に使用するクリップ開放荷重を，2種類のクリップ（幅約 75mm と約 37.5 mm）を用いて求めた。各 3 個のクリップ試験結果から，保守的に 1795 N/個（幅約 75mm のクリップ開放試験での平均値 - 3σ）×  個 + 1042 N/個（幅約 37.5mm のクリップ開放試験での平均値 - 3σ）×  個 = 約 30.8 kN と評価した。

なお、クリップはオペフロ BOP が傾くことを回避し、可能な限り平行移動するよう、上下での抵抗が可能な限り同じとなるように配置する方針とする。この場合、パネル下側はパネル移動時に摩擦力が発生するが、パネル上側には摩擦力が発生しないため、オペフロ BOP 上端側には摩擦力相当分のクリップ（幅約 37.5mm，個）を増加して設置する。

このため、クリップは（幅約 75mm のクリップ個，幅約 37.5mm のクリップ個），（幅約 75mm のクリップ個）の合計 18 個分とする。

(5) 摩擦力（摩擦係数）(③)

摩擦力算定に用いる摩擦係数は静止摩擦係数を採用して設計する。なお、オペフロ BOP 移動時に生じる摩擦による抗力についても、保守的にを採用して設計する。この場合の摩擦による抗力は約kN（ $1500 \text{ kg} \times \text{} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = \text{} \text{ N}$ ）と評価した。

(6) シール材の抗力 (④)

シール材はシール材目地深さ約 10mm として設計するため、シール材接触面積が約  
(パネルサイズは約 4160 mm×約 4260 mm であり、この周長は  
であるため、シール材接触面積は) である。また、シール材の破断試験結果より最大せん断応力約N/mm<sup>2</sup>、最大せん断耐力時のせん断変形角は約%であるため、シール材の最大抗力は、約N/mm<sup>2</sup>×=約kN と評価される。

一方、クリップ試験結果からクリップはパネルが約 10 mm 移動した際に最大耐力を示すが、約 10 mm 移動した際のシール材の抗力は最大抗力の以下であり、25 mm 程度でクリップは完全にオペフロ BOP から外れることが判明している。このためクリップの最大荷重時に重畳させるべきシール材の抗力として、シール材が約mm せん断変形した場合のシール材の抗力を考慮する。シール材目地幅はmm であるので、mm の移動は 50 %のせん断変形角に相当し、その際の荷重は破断試験結果より約kN である。

(7) まとめ

以上より、S d による地震荷重は約 19.2 kN、クリップのみの抗力は約 30.8 kN となり、クリップ抗力等を保守的に見積もっても弾性設計用地震動 S d による地震荷重を十分に上回り、下限側の条件を満足できることを確認した。

また、クリップ試験の結果から、クリップの最大耐力は、幅約 75 mm のクリップ開放試験での平均値+3σ は約 1819 N であり、幅約 37.5 mm のクリップ開放試験での平均値+3σ は約 1270 N であるため、クリップ 18 個で約 31.6 kN となる (②上限側)。そのため、クリップ抗力+摩擦による抗力+シール材の抗力の合計は約 40.2 kN (約 31.6 kN+約kN+約kN=約 40.2 kN) となり、設計差圧 3.43 kPa 時の開放荷重約 52.2 kN を下回するため、上限側の条件を満足できることを確認した。

このため、クリップ開放試験での平均値+3σ または-3σ を考慮したとしても、弾性設計用地震動 S d 及び設計差圧 3.43kPa 時の開放荷重約 52.2 kN に対して、3 割程度 (約 10kN 程度) の十分な余裕を有しており、公差 (±1.0mm) を考慮してもブローアウトパネルの機能は確保される。

## 2. 主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル

主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室 BOP」という。）の満たすべき開放条件について整理した。MS トンネル室 BOP を開放させるために満足すべき条件は以下の通りであり、MS トンネル室 BOP の開放圧力が設計差圧以下（9.81kPa 以下）となる必要がある。また、2次格納施設としての原子炉建屋原子炉区域のバウンダリ機能確保の観点から、弾性設計用地震動 S d で開放しないように設計する。

$$\boxed{\text{①弾性設計用地震動 S d による地震荷重}} < \boxed{\text{②MS トンネル室 BOP 開放圧力 (設計条件 7.85±1.96kPa)}} < \boxed{\text{③設計差圧 9.81kPa による開放圧力}}$$

各項目の考え方、根拠は以下のとおり。

### (1) 基本パラメータ・条件

MS トンネル室 BOP の重量は、0.54 kg/m<sup>2</sup>として評価する。

弾性設計用地震動 S d の加速度は、ブローアウトパネル設置位置より高い、MS トンネル室 BOP 上部天井（T.M.S.L. 23.5 m）での設計用床応答曲線（S d）より得られる動的震度 0.96G を用いて評価する。

### (2) 設計差圧 9.81 kPa 時の開放圧力（③）

設計差圧以下で MS トンネル室 BOP を開放させるため、設計差圧 9.81kPa とする。

### (3) 弾性設計用地震動 S d による開放荷重（①）

弾性設計用地震動 S d による地震力は、約 0.00509kN/m<sup>2</sup>（0.54 kg/m<sup>2</sup>×0.96G×9.8 m/s<sup>2</sup>=5.08032N/m<sup>2</sup>）とする。なお、MS トンネル室 BOP の固有振動数は、固有値解析により算出し、1次固有振動数は約  Hz となる。このため、設計用床応答曲線（S d）を用いて地震力を算出する。

### (4) MS トンネル室 BOP の開放圧力（②）

破裂試験の結果、破裂圧力は 7.53kPa～7.85kPa である。

### (5) まとめ

以上より、S d による地震荷重は約 0.00509kN/m<sup>2</sup>、MS トンネル室 BOP の開放圧力が 7.53kPa～7.85 kPa であり、下限側の条件を満足できることを確認した。

また、MS トンネル室 BOP の開放圧力は 7.53kPa～7.85 kPa、設計差圧は 9.81kPa であり、上限側の条件を満足できることを確認した。

## クリップ引張試験の回数について

## 1. 引張試験の目的と試験回数の設定根拠

クリップは燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）を建屋躯体に固定するとともに、オペフロ BOP の開放圧力を決定する主要な部品であるため、クリップ単体での開放試験を実施した（補足説明資料 4-3 「クリップ引張試験について」）。

クリップの引張試験の回数を決めるに当たっては、金属製品であり公差を±1.0mm と小さくでき、また各種規格における試験体数を踏まえて3体とした。

表 4-1 各種規格等における試験体数について

規格等名称	記載内容
金属材料のシャルピー衝撃試験方法 (JIS Z 2242 : 2018)	
発電用原子力設備規格設計・建設規格 (2012年版)	
建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説	



## 2. 引張試験結果

クリップの引張試験の試験結果を表2に示す。

クリップ幅約 75 mm の最大耐力の平均値は 1807 N、標準偏差  $\sigma$  は 4 N であった。また、クリップ幅約 37.5 mm の最大耐力の平均値は 1156 N、標準偏差  $\sigma$  は 38 N であった。

表 4-2 実機用クリップ試験結果

耐力 (試験体数は3個)		クリップ幅約75mm	クリップ幅約37.5mm
		荷重 (N)	
最大耐力	1回目	1803	1206
	2回目	1807	1146
	3回目	1812	1115
	平均値	1807	1156
標準偏差 $\sigma$		4	38
最大耐力 (平均) $+3\sigma$		1819	1270
最小耐力 (平均) $-3\sigma$		1795	1042

## 3. クリップの抗力算定について

クリップの抗力算定に使用するクリップ開放荷重を、2種類のクリップ(幅約 75 mm と約 37.5 mm)を用いて求めた。各3個のクリップ試験結果から、保守的に 1795 N/個(幅約 75 mm のクリップ開放試験での平均値 $-3\sigma$ ) $\times$ □個+1042 N/個(幅約 37.5 mm のクリップ開放試験での平均値 $-3\sigma$ ) $\times$ □個=約 30.8 kN と評価した。このため、S<sub>d</sub>による地震荷重は約 19.2 kN、クリップのみの抗力は約 30.8 kN となり、弾性設計用地震動S<sub>d</sub>による地震荷重を十分に上回っている。

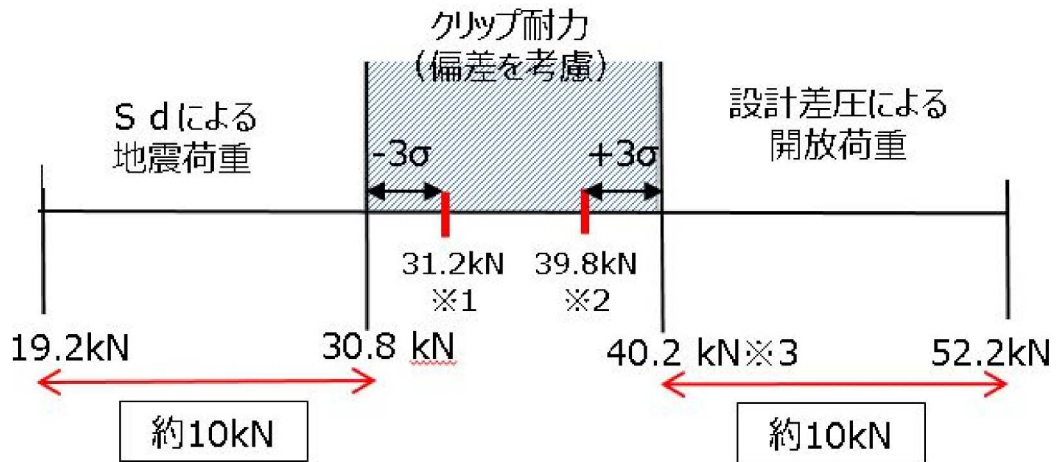
また、クリップ試験の結果から、クリップの最大耐力は、幅約 75 mm のクリップ開放試験での平均値 $+3\sigma$  は約 1819 N であり、幅約 37.5 mm のクリップ開放試験での平均値 $+3\sigma$  は約 1270 N であるため、クリップ 18 個で約 31.6 kN となる。そのため、クリップ抗力+摩擦による抗力+シール材の抗力の合計は約 40.2 kN(約 31.6 kN+約 □ kN+約 □ kN=約 40.2 kN)となり、設計差圧 3.43 kPa 時の開放荷重約 52.2 kN を十分に下回っている。

なお、クリップ開放試験の平均値から算定したクリップのみの耐力は、幅約 75 mm のクリップが約 1807 N/個であり、幅約 37.5 mm のクリップが約 1156 N/個であるため、クリップ 18 個で約 31.2kN となる。また、クリップ抗力+摩擦による抗力+シール材の抗力の合計は約 39.8 kN(約 31.2 kN+約 □ kN+約 □ kN=約 39.8kN)となる。

以上より、試験結果に $+3\sigma$  または $-3\sigma$  を考慮したとしても、S<sub>d</sub>による地震荷重約 19.2kN 及び設計差圧 3.43kPa 時の開放荷重約 52.2 kN に対して、3割程度(約 10kN 程度)の十分な余裕を有している。

また、クリップの引張試験の結果を踏まえると、クリップ幅が半分になると耐力も半分程度になるため、おおむねクリップ幅と耐力は線形の関係にあると考えられる。このため、クリップの

製造の際に公差 (±1.0mm) を考慮するが、公差によりクリップ幅の違いが生じたとしても、クリップ 1 個あたりの耐力の変化は最大で約 15N であり、仮に 18 個のクリップすべてが最大の公差となったとしてもクリップのみの耐力は約 0.3kN 程度しか変わらず、ブローアウトパネルの機能に影響を与えるものではない。



- ※1：クリップ試験の平均値から算定したクリップのみの耐力
- ※2：クリップ試験の平均値から算定したクリップ耐力にシール材の抗力、摩擦による抗力を加えたもの
- ※3：シール材の抗力、摩擦による抗力を含む

図3 クリップの耐力と地震荷重及び開放荷重との比較

## クリップ破損時の他設備への影響について

## 1. 概要

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）のクリップは、ボルトにて躯体側に固定する設計（実機用クリップ試験も模擬して固定）としており、容易に脱落することはないが、オペフロ BOP の開放時に、クリップが脱落した場合を想定し、この影響について検討し、燃料取替床に設置されている設備への影響がないことを確認した。

## 2. 評価方法

オペフロ BOP より建屋内側には竜巻防護ネットが設置されているため、竜巻防護ネットで捕捉できるかを評価することにより、燃料取替床に設置されている設備への影響を確認する。

## 3. 評価結果

以下のとおり評価し、万一、クリップが脱落した場合でも竜巻防護ネットにより捕捉できることから燃料取替床に設置されている設備への影響はないことを確認した。

## (1) 竜巻防護ネット通過有無

竜巻防護ネットはオペフロ BOP より内側にあるため、竜巻防護ネットの通過有無について評価した。

## a. クリップの寸法

クリップの寸法を図 3-1 に示す。

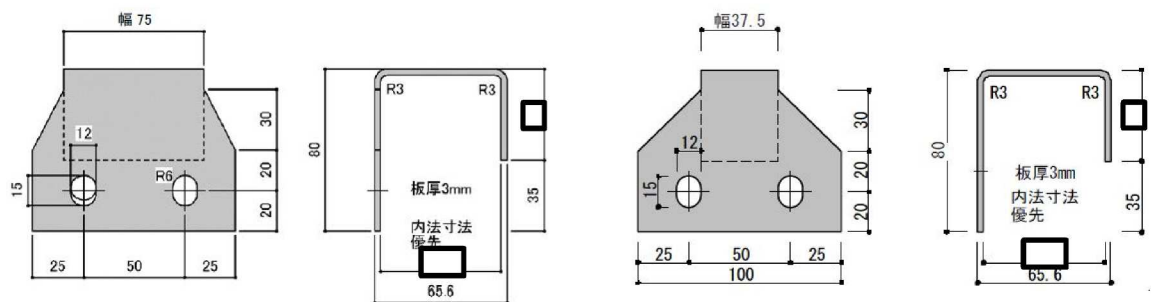


図 3-1 クリップ寸法図（正面図・断面図）

b. 竜巻防護ネットの網目寸法

竜巻防護ネットの配置及び網目寸法を図 3-2 及び図 3-3 に示す。

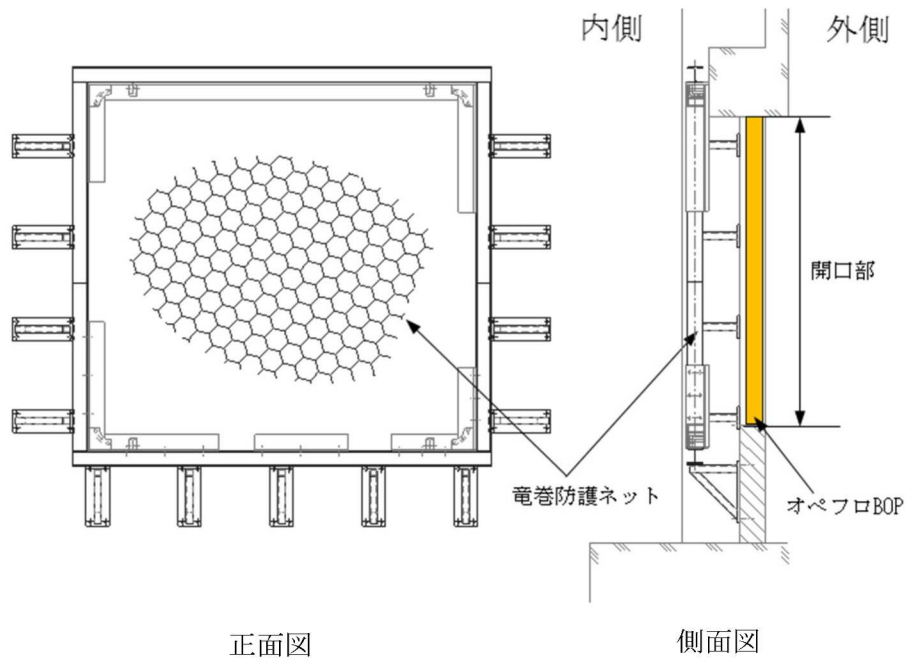


図 3-2 竜巻防護ネット配置図（立面図）

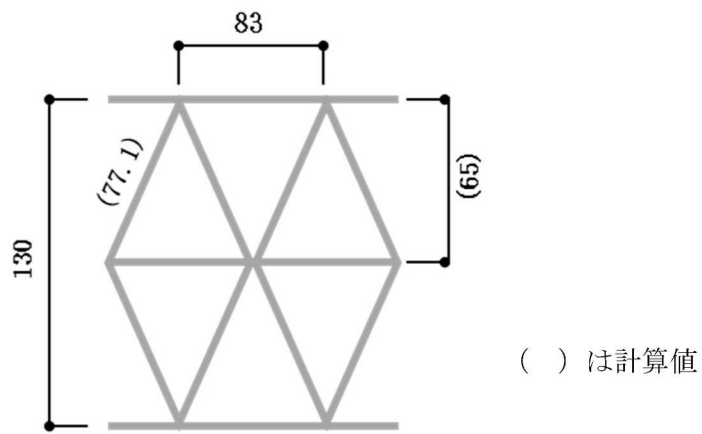


図 3-3 竜巻防護ネット網目寸法図

c. 竜巻防護ネット通過有無

竜巻防護ネットの最大寸法 83mm に対し、クリップの形状及び寸法から竜巻防護ネットを通過することはない。



## ブローアウトパネル開放時の他設備への影響について

1. 燃料取替床ブローアウトパネルのチェーンが、燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置に干渉しない設計

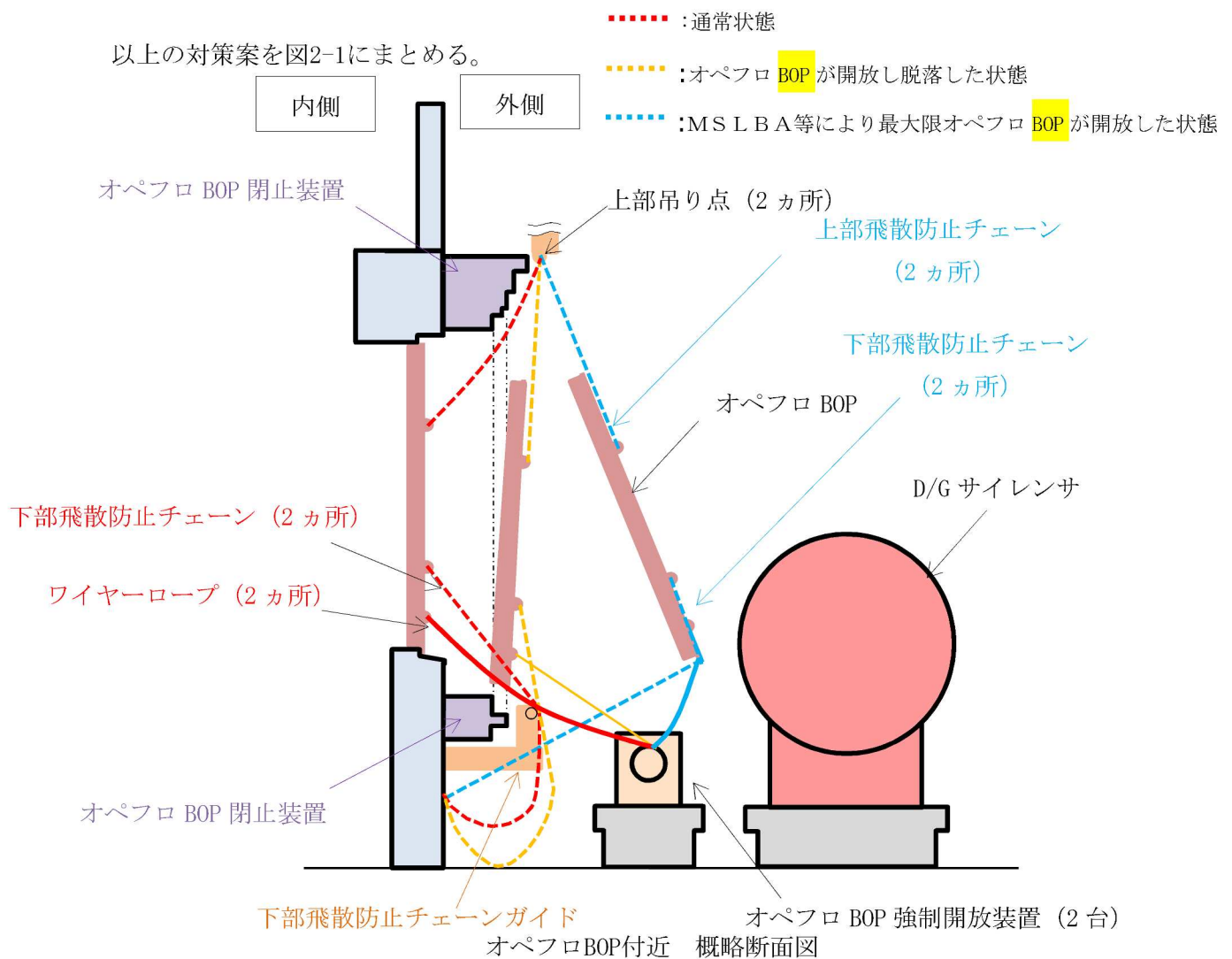
燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロBOP」という。）上部及び下部に設置する飛散防止チェーンは、上部は燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロBOP閉止装置」という。）の外側へ架台を設置、下部は干渉防止ガイドを設置することで、オペフロBOP閉止装置のレールに接触しない配置とする。

2. オペフロBOPのチェーンが落下の衝撃荷重に十分耐える設計

十分な強度を有する落下防止チェーンを設置する。使用するチェーンはオペフロBOP開放時の運動エネルギーに対して十分な裕度を持った設計とする。

また、モックアップ試験でオペフロBOPを開放した際、落下荷重に対してチェーンは健全な状態を維持していることを確認した。

以上の対策案を図2-1にまとめる。



## ブローアウトパネル機能確認試験要領について

## 1. 目的

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）及び主蒸気系トンネル室ブローアウトパネル（以下「MS トンネル室 BOP」という。）の機能を確認するため、実機規模の試験体を用いた開放試験を行い、機能維持確認を実施する。

## 2. オペフロ BOP

## 2.1 試験場所

試験装置等を設置し新たに試験会場として設定

## 2.2 試験項目

- (1) 作動確認 : オペフロ BOP の開機能確認
- (2) 閉維持確認 : オペフロ BOP の耐震性能の確認

オペフロBOP（取付け枠及び新たに設計したクリップを含む）を設置した実機大のモックアップ試験体を製作し、設計作動圧の3.43 kPa以下で確実に開放されることを確認するため、油圧ジャッキを用いた加力による開放試験を実施する。さらに、本試験にて実測する開放に必要な荷重より、シール材の抗力及びパネル下部（パネル及びすべり台）の摩擦による抗力を求め、クリップの条件を必要に応じて最適化する。

また、オペフロ BOP の耐震性能を確認する。

本試験での確認事項を以下に示す。

## 【作動確認】

- ①オペフロBOPの開放動作の確認
- ②オペフロBOPの開放荷重の確認
- ③クリップ脱落荷重の確認\*
- ④シール材抗力及び下部摩擦による抗力の開放荷重に与える影響の確認

## 【閉維持確認】

- ①固有周期測定
- ②オペフロBOPがS d相当荷重で開放しないこと（パネルの荷重曲線より評価）

注記 \* : クリップがオペフロBOPに取り付けられた山形鋼から完全に外れて荷重を負担しなくなった時点をクリップ脱落とする。また、クリップのひずみ計測などから判断し、その時の荷重を確認する。図2-1にクリップの固定状態及び脱落状態を示す。

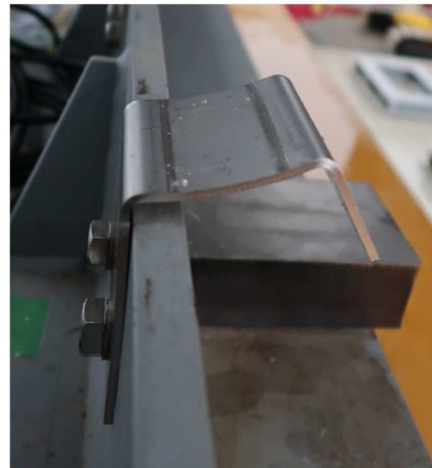


図 2-1 クリップの固定状態及び脱落状態

### 3. オペフロBOP試験概要

#### 3.1 試験場所概要

モックアップ試験は、オペフロBOP及び取付け架台を試験場で作成し実施する。図3-1に試験場の配置図を示す。

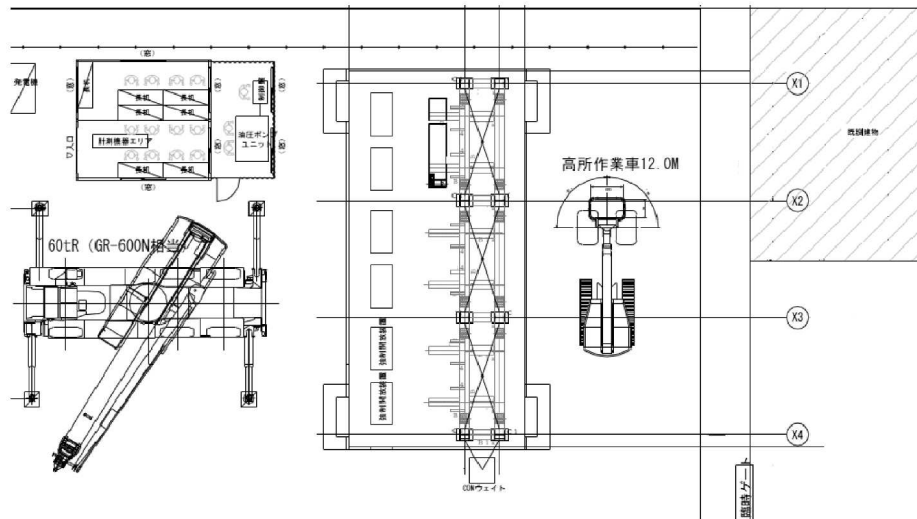


図3-1 試験場配置図（平面図）

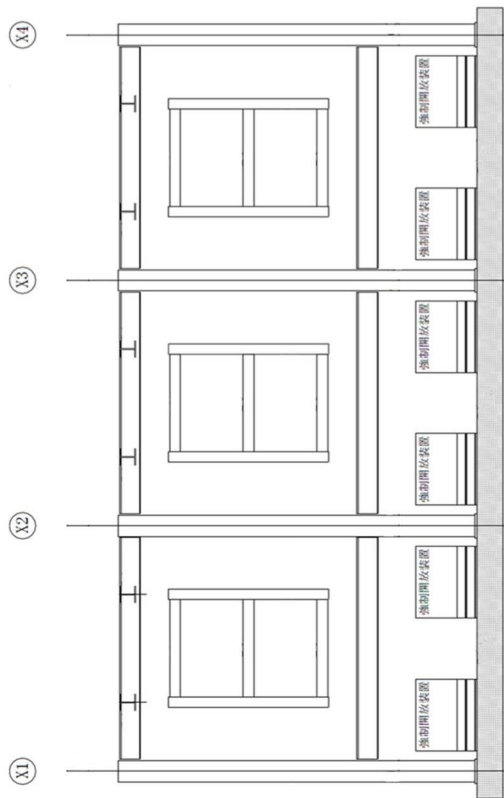
#### 3.2 試験装置概要

試験装置は、実機を模擬したオペフロBOP、加力装置及び躯体を再現するオペフロBOP取付け部と加力装置取付け部を一体化した取付け架台で構成する。図3-2に試験で使用するオペフロBOP及び取付け架台の概略図を示す。

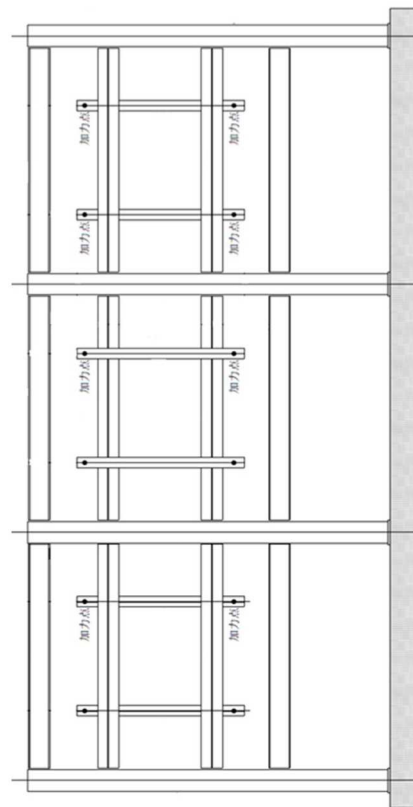
オペフロBOPは実機に取り付けられているオペフロBOPを模擬して実施する。サイズは約4.16 m×約4.26 m、重量は約1.5 tである。なお、オペフロBOPは3体製作する。

取付け架台は四方が鉄筋コンクリート造の原子炉建屋開口部を再現する。パネルとの接触により摩擦の影響を強く受ける開口部下部は実機同様すべり台とし、開口部の側面および上面側はH形鋼によって再現する。

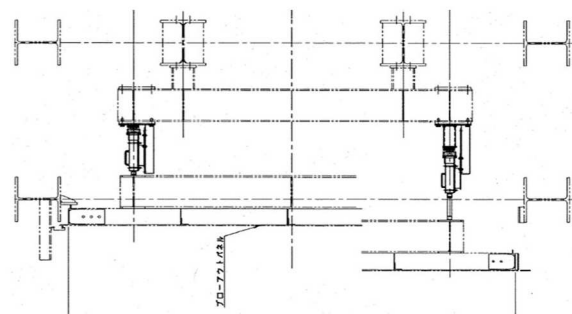
試験体のオペフロBOPは、脱落時の損傷等を防止するために、2本のチェーンにて落下を防止し、復旧による複数回の試験を実施可能とするものとする。



パネル及び押し出し梁図



試験用架構図



側面図

図 3-2 オパフロ BOP 及び取付け架台の概略立面図

### 3.3 オペフロBOPの架台への取付け方法

オペフロBOPは、屋外側上部及び左右の3面にシーリング材を施工する。シーリング材は、シリコンシーラントとし、目地深さは10mmとする。オペフロBOPは、試験装置架台（実機では躯体）に取り付けられた溝形鋼と、オペフロBOPに取り付けられた山形鋼をクリップで挟むことにより固定する。クリップを取り付け可能な箇所は、（幅約75mmを個、幅約37.5mmを個）、（幅約75mmを個）の計18箇所とする。

クリップの形状および溝形鋼への取付け位置を図3-3に示す。クリップの材質はSUS304とし、形状は図3-3に示すように、クリップ幅約75mmまたは幅約37.5mm、厚み約65.6mm、溝形鋼への掛り代約とし、M12ボルトにより取付け枠の16mmプレートに取付ける。

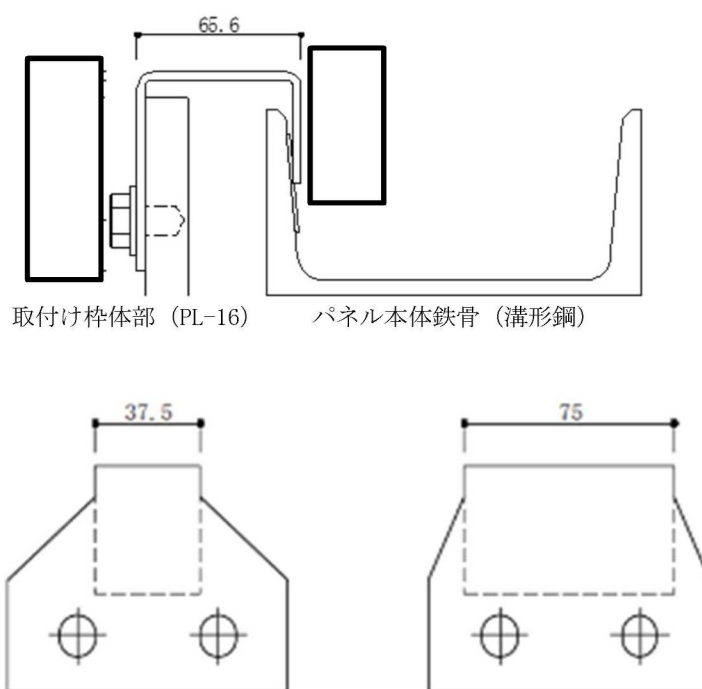


図 3-3 クリップ形状及び取付け位置図（正面図・断面図）



### 3.4 固有周期測定方法

オペフロ BOP 試験体に加速度計を取り付け、オペフロ BOP の固有振動数をハンマーによる打撃，又は常時微動計測により測定し固有周期を求める。

注：地盤は常に僅かに揺れており，この微振動を常時微動という。常時微動は，風や波浪などの自然現象や，交通機関，工場の機械などの人工的振動など不特定多数の原因により励起される。この常時微動で地盤や構造物の振動特性を推定することができる。

#### 試験概要

##### (1) 計測方法

###### a. ハンマーによる打撃

オペフロ BOP 試験体中央部に設置した加速度計の傍をゴムハンマー（267.5 g）で打撃し，加速度を計測する。

###### b. 常時微動計測

オペフロ BOP 試験体中央部に設置した加速度計により常時微動により励起された加速度を計測する。

##### (2) 計測機器

計測機器の取付け位置を図 3-5 に示す。

###### a. 加速度計

メーカー名称：, 型番名称：

###### b. アンプ

メーカー名称：, 型番名称：

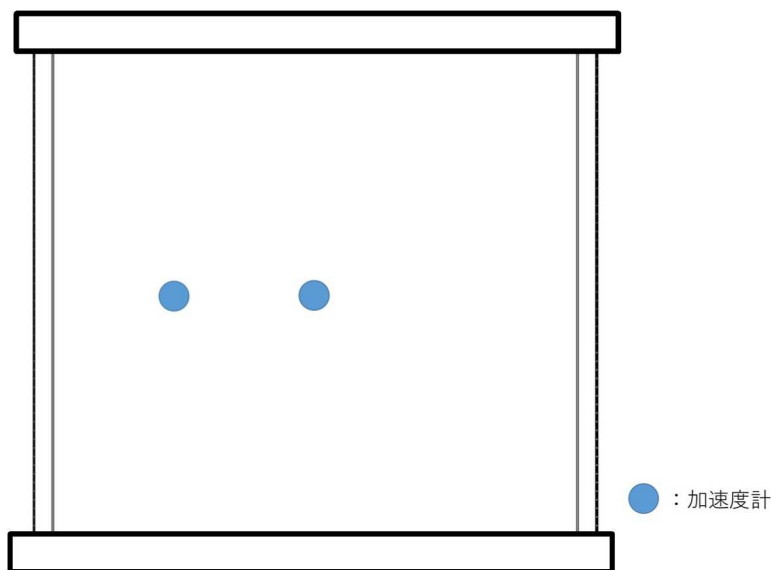


図3-4 計測機器取付け位置図（立面図）

#### 4. オペフロBOPの加力方法

##### 4.1 試験機器構成及び加力方法概要

本試験に使用する機器の配置及び構成の概念図を図4-1に、試験用の架構のイメージを図4-2に示す。

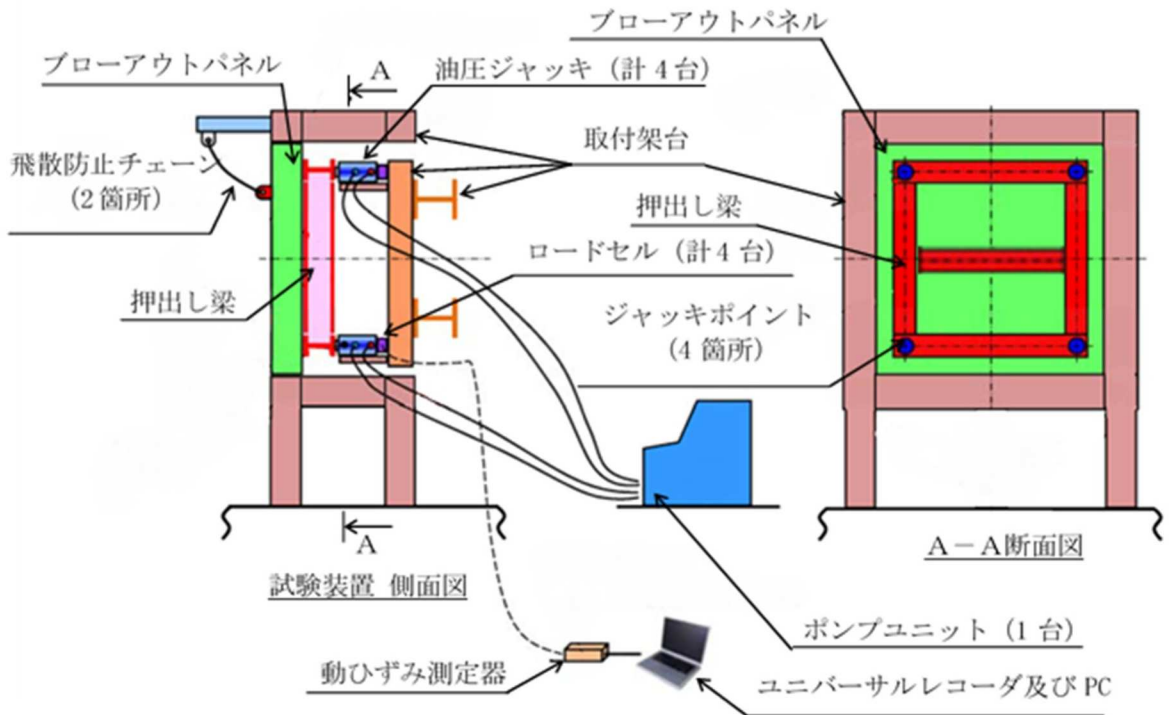


図 4-1 試験機器配置及び構成概念図

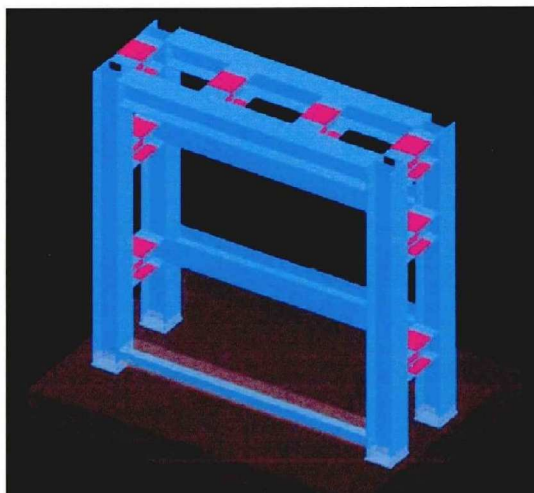


図 4-2 試験用架構 (イメージ図)

試験用架構にオペフロBOP1面を取り付ける。当該パネルに「押し出し梁」を接触させ、その「押し出し梁」を4台の油圧ジャッキを使用して押し出すことにより、オペフロBOPを加力する。

「押し出し梁」はオペフロBOPに対して独立しておりオペフロBOPの開放条件に影響を与えないものとする。

油圧ジャッキの反力は取付架台で受ける構造とする。

また、各油圧ジャッキの反力側にはロードセルを取り付け、各油圧ジャッキから試験体への負荷を測定するものとする。各ロードセルはロードセルモニタにて出力を抽出・変換し、それぞれの出力はユニバーサルレコーダ及びPCで記録するものとする。

試験体は既設仕様に合わせて3体製作する。試験体仕様を表4-1に示す。

表4-1 試験体仕様（試験体1～3）

製 造	清水建設株式会社
型 式	既存パネル模擬
概算質量	1500 kg
数量	各1面
サイズ	幅 4260 mm×高さ 4160 mm
クリップ取付け箇所	18箇所*
シール材	シリコンシーラント

注記 \*：クリップ個数及び形状は、試験体により変更する場合有り。

#### 4.2 加力仕様

オペフロBOPを押し出し梁により加力するために、複動型油圧ジャッキ4台を使用する。ジャッキは1台のポンプユニットから加圧する。当該ポンプユニットは、4台のジャッキへの吐出油圧を一定とすることで、一定の加重にて作動を制御する。

加力方法概要図を図4-3に、押し出し梁の支持装置を図4-4に示す。油圧ジャッキ及びポンプユニットの仕様を表4-2、表4-3に示す。

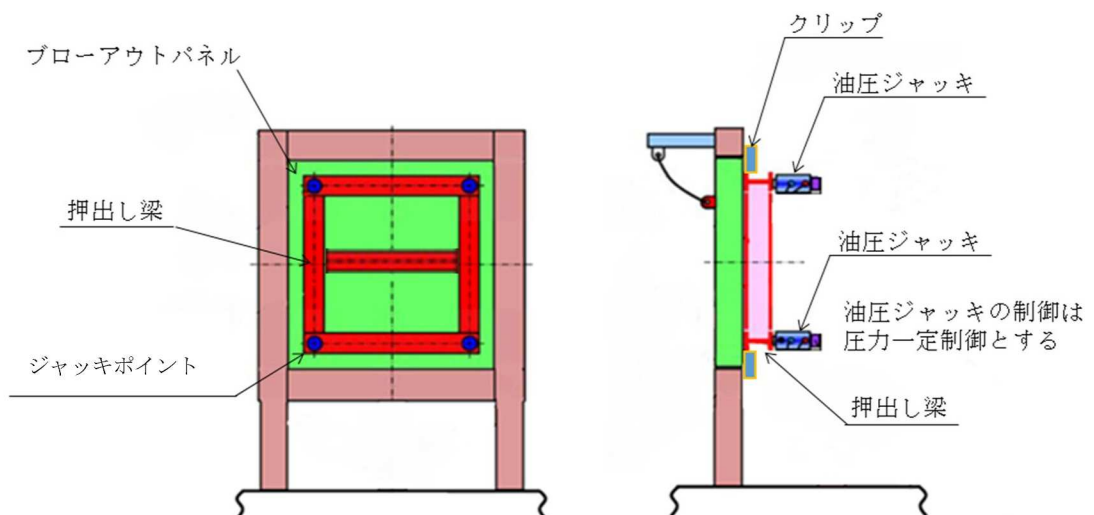


図4-3 加力方法概要立面図



図4-4 押し出し梁と支持装置の概要断面図

表4-2 油圧ジャッキ仕様

製造メーカー	[Redacted]	
型 式		
能力 (1台あたり)		
使用数量	4台	
ストローク (最大)	[Redacted]	
伸長速度 (理論値)		

表4-3 ポンプユニット仕様

製造メーカー	[Redacted]	
型 式		
吐出量		
使用数量	1台	
電 源	[Redacted]	
電動機		
質 量		

### 4.3 オペフロBOP試験方法

#### (1) 試験手順

モックアップ試験は3ケース実施した。試験ケースを表4-4に示す。

試験体1のクリップ配置は            (幅約75mmを    個, 幅約37.5mmを    個),            (幅約75mmを    個) とする。これは、現状で予想されるシールの抗力とパネル下部の摩擦, クリップ1個あたりの耐力から, S d 地震時には開放せず, かつ, 設定差圧の3.43 kPa以下にて確実に開放するように設計された配置である。下側のクリップについては, 摩擦による抗力を考慮して    個減らしている。試験体1のクリップ取付け位置を図4-5に示す。また, 試験体2, 3は, 試験体1と同条件にて再現性を確認する。

表 4-4 試験ケース

	クリップの配置 及び個数		クリップ形状, 取付け寸法			備考
	上	下	幅	内寸法	掛かり代	
試験体 1			約 75・約 37.5 mm			
試験体 2			約 75・約 37.5 mm			
試験体 3			約 75・約 37.5 mm			

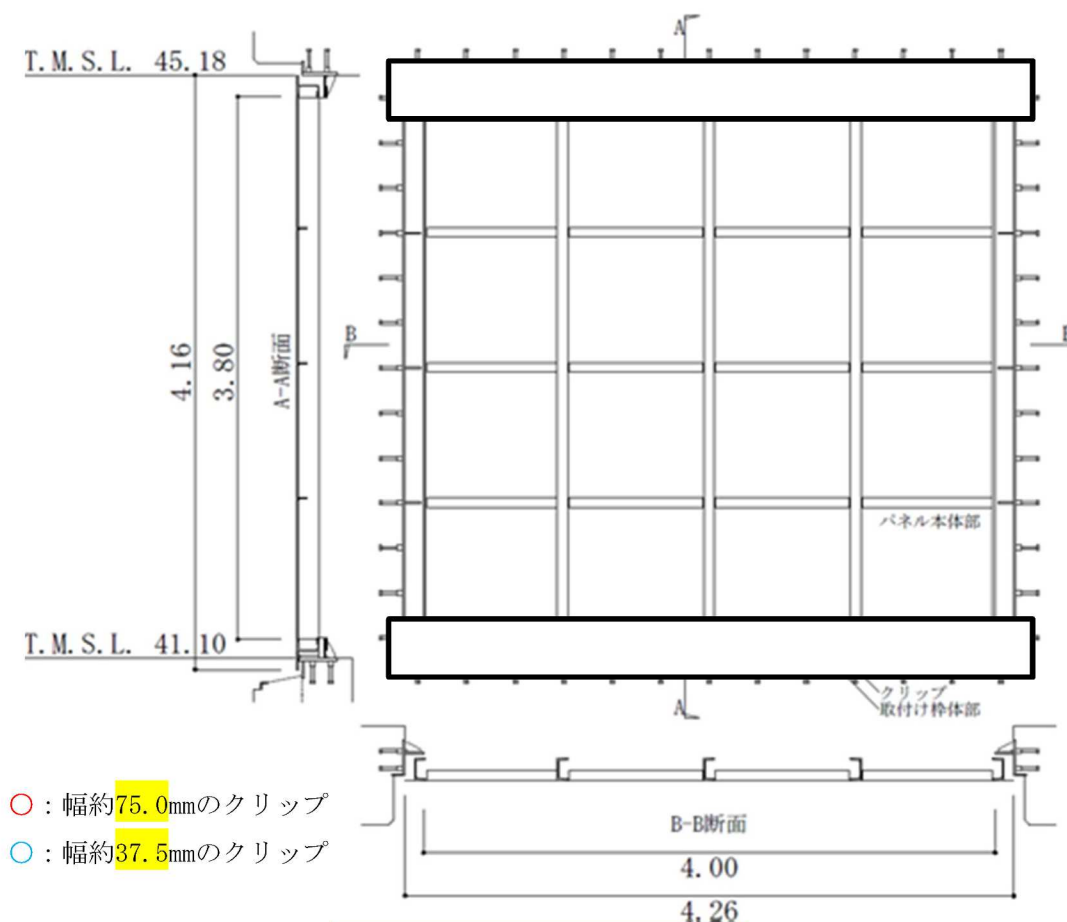


図 4-5 クリップ配置図 (立面図)

4.4 測定内容及び方法

(1) 測定内容

各油圧ジャッキ負荷，変位

(2) 測定方法

各油圧ジャッキに1台ずつ配置したロードセルを使用する。その他の測定項目と連動し，時刻歴測定とする。

計測項目は，ジャッキによる加力荷重4点（上記，荷重計より取得），ブローアウトパネルの変位4点（加力位置近傍の変位），クリップのひずみ4点（試験時の開放状況を動画撮影）とする。荷重，変位及び，ひずみ計測の機器構成を図4-7に示す。加力が短時間で終了する試験のため，動的な計測システムを用い，サンプリング時間は□秒程度とする。

表4-5に計測機器等仕様を示す。

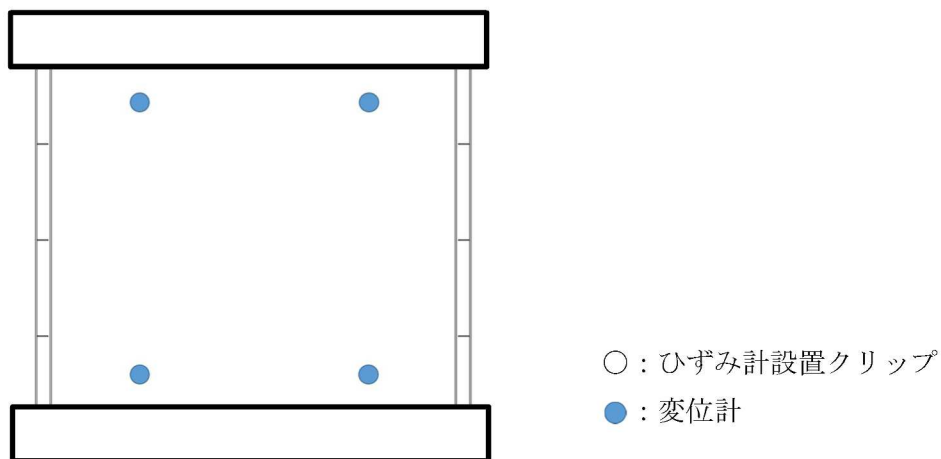


図4-6 計測器取付け位置図（立面図）

表4-5 計測機器等仕様（又は相当品）

No.	機器名	員数	メーカー	型番
1	電動ポンプユニット			
2	複動型油圧ジャッキ			
3	薄型圧縮型ロードセル			
4	レーザ変位計			
5	動ひずみ測定器			
6	ユニバーサルレコーダ			
7	コンディショナカード			
8	ノートパソコン			

注：ケーブル等の付属品は省略



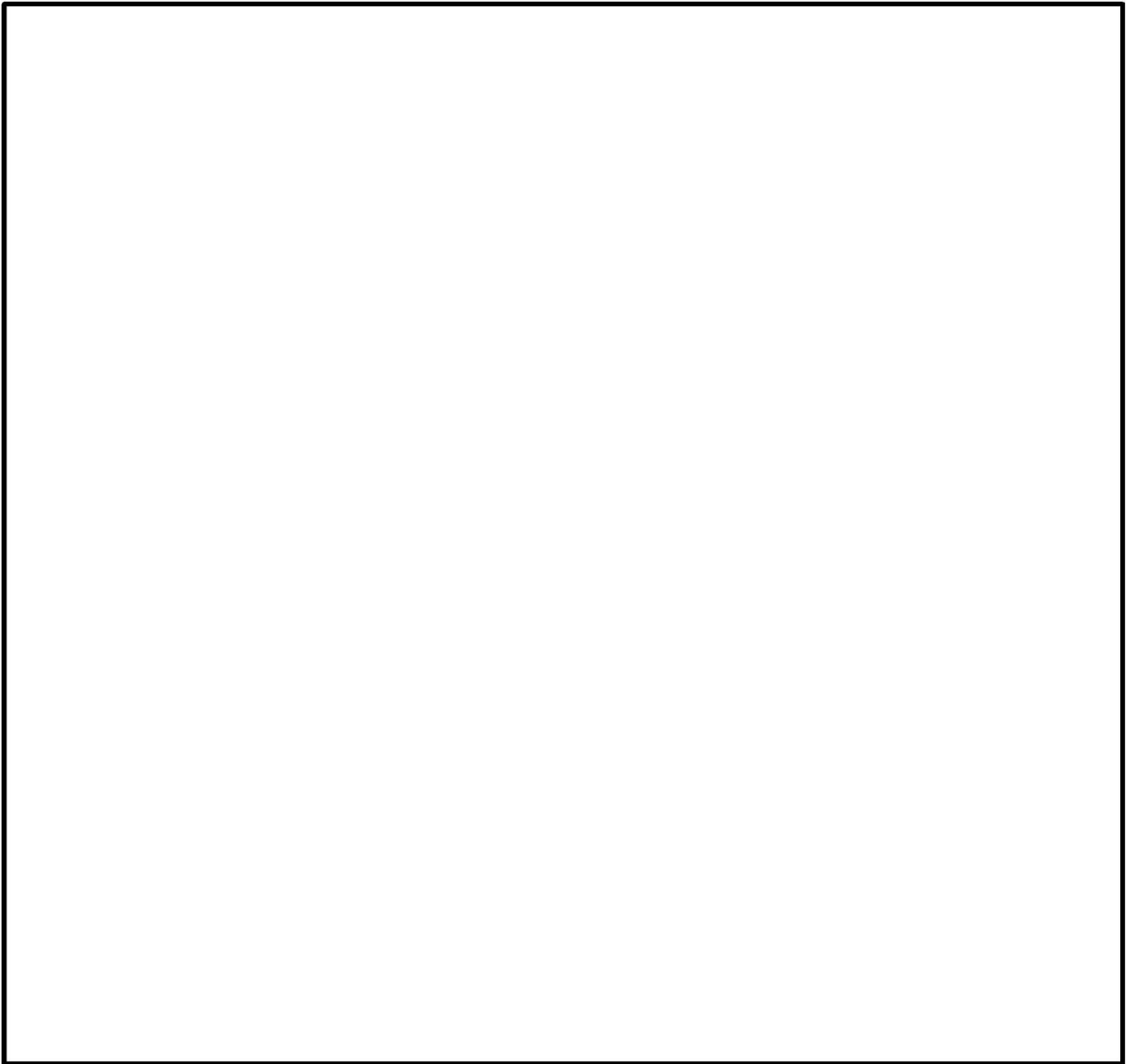


図 4-7 計測システム構成

(3) 確認項目

開放試験における確認項目を以下に示すとともに、オペフロBOPの開放時の荷重と変位及び他の抗力との関係を求める。

開放試験にて得られる記録値とこの関係から、オペフロBOPの耐震性能を確認する。

- ・ ジャッキ荷重 - 変位関係 (グラフ)
- ・ オペフロBOPの開放荷重
- ・ クリップの脱落時荷重
- ・ シール材の抗力と下部の摩擦

(4) 判定基準

【作動確認】

オペフロBOPが設計差圧 (3.43 kPa以下) の圧力にて開放すること

【閉維持確認】

オペフロBOPの開放時の荷重が S d 荷重相当値 (約19.2 kN) 以上であること

## 5. MS トンネル室 BOP

### 5.1 試験場所

#### 【作動確認】

場 所：株式会社 ブイテックス 東海工場

#### 【閉維持確認】

場 所：清水建設株式会社 技術研究所 先端地震防災研究棟

### 5.2 試験項目

- (1) 作動確認 : MS トンネル室 BOP の開機能確認
- (2) 閉維持確認 : MS トンネル室 BOP の耐震性能の確認

MS トンネル室BOP及びその取付け枠を設置した実機大のモックアップ試験体を製作し、設計作動圧の9.81kPa以下で確実に開放されることを確認するため、圧縮空気による破裂試験を実施する。

さらに、加振試験により、MS トンネル室 BOP の耐震性能を確認する。

本試験での確認事項を以下に示す。

#### 【作動確認】

- ①MSトンネル室BOPの破裂圧力の確認

#### 【閉維持確認】

- ①MSトンネル室BOPが弾性設計用地震動  $S_d$  及び基準地震動  $S_s$  相当荷重で開放しないことの確認

## 6. MSトンネル室BOP作動確認試験概要

### 6.1 試験装置概要

試験装置は、実機を模擬したMSトンネル室BOP（ラプチャーパネル及びラプチャーパネル取付け部）と温度調整用のヒーターを取り付けた破裂試験装置で構成する。図6-1に試験で使用するMSトンネル室BOP及び破裂試験装置の概略図を示す。

MSトンネル室BOPのサイズは780 mm×780 mm，比重は約 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。

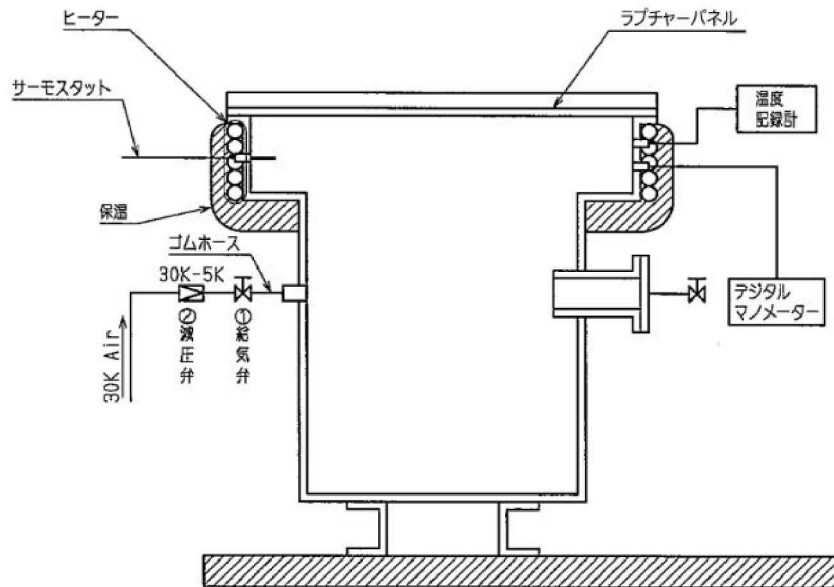


図 6-1 MS トンネル室 BOP 及び破裂試験装置の概略断面図

### 6.2 MS トンネル室 BOP 試験方法

#### (1) 試験手順

MSトンネル室BOPを破裂試験装置に組み込み，破裂試験装置の上部をヒーターで加熱し，温度を調整する。

所定温度に到達してから20分以上保持後，給気弁を開き，圧縮空気を装置内へ送り，破裂時の圧力を確認する。

#### (2) 確認項目

MS トンネル室 BOP 破裂時の圧力。

#### (3) 判定基準

MS トンネル室 BOP が設計差圧（9.81 kPa 以下）の圧力にて開放すること。

## 7. MSトンネル室BOP閉維持確認試験概要

### 7.1 試験場所概要

閉維持確認試験は、加振試験用枠体に固定したMSトンネル室BOPを振動台上に設置し実施する。図7-1に試験場の配置図を示す。

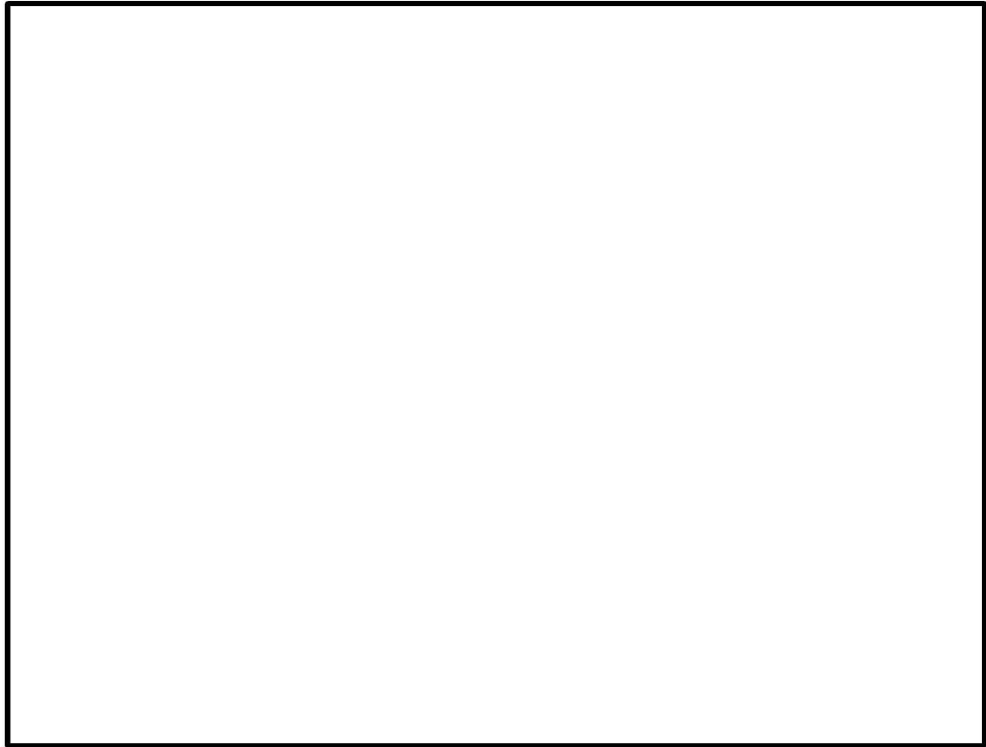


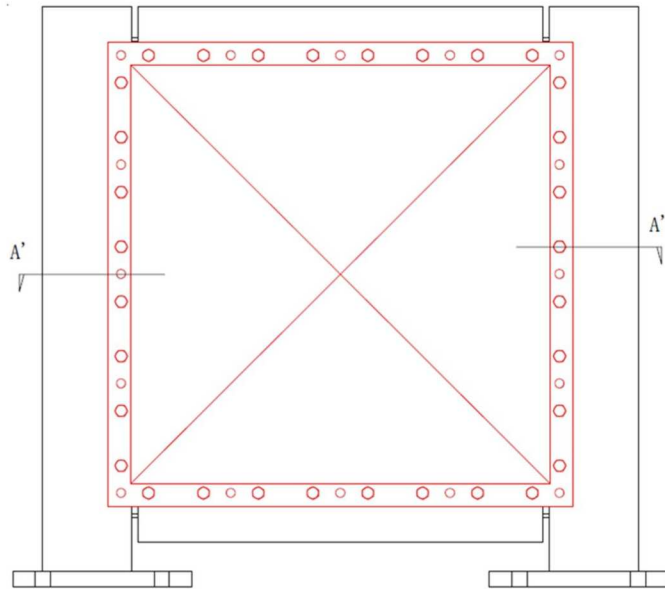
図7-1 試験場配置図 (平面図)

### 7.2 試験装置概要

図7-2に試験で使用するMSトンネル室BOP及び加振試験用枠体の概略図を示す。

MSトンネル室BOPのサイズは780 mm×780 mm，比重は約 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ である。加振試験用枠体はH形鋼により構成されており，加振試験用枠体を振動台に固定し，ボルトによってMSトンネル室BOPを加振試験用枠体に固定する。

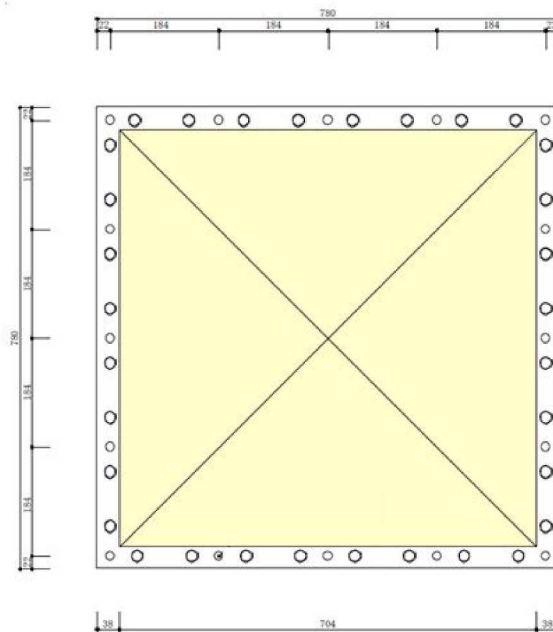
なお，試験体のMSトンネル室BOPは3体製作し，それぞれに対し同一の試験を実施する。



加振試験用枠体  
(MS トンネル室 BOP 取付け時)



加振試験用枠体  
(A-A 断面図)



MS トンネル室 BOP (立面図)

図 7-2 MS トンネル室 BOP 及び加振試験用枠体の概略図



(1) 試験機器構成

本試験に使用する試験体の仕様を表7-1に示す。

表 7-1 試験体仕様表

製 造	清水建設株式会社
型 式	既存パネル模擬
比 重	約 $2.7 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> (アルミ)
数 量	3 枚
サイズ	幅 780 mm × 高さ 780 mm

(2) 試験台の仕様

本試験に使用する振動台の仕様を表 7-2 に示す。

表 7-2 振動台仕様

項 目	仕 様
振動台寸法	7m (X 方向) × 7m (Y 方向)
加振方向	3 軸
最大搭載重量	70t
最大加速度 (10 t 積載時)	水平 : 3.7G, 鉛直 : 2.4G

7.3 試験ケース

MSトンネル室BOPの加振試験による耐震性能確認を行う。試験ケースを表7-3に示す。

表 7-3 試験ケース

加振波	加振方向	備考
模擬地震波	XYZ方向	S d 地震相当
模擬地震波	XYZ方向	S s 地震相当

7.4 加振波

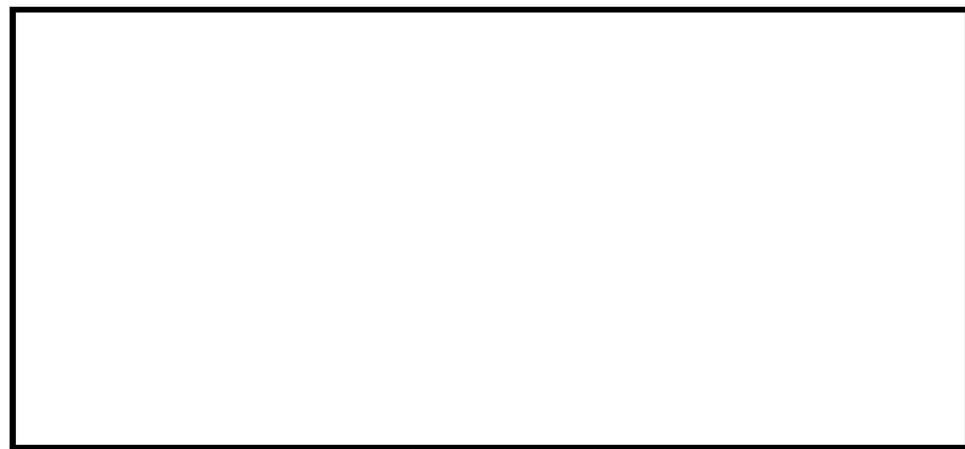
(1) MSトンネル室BOPの基準地震動 S s 加振波

加振試験用の模擬地震波は以下のとおりとする。V-2「耐震性に関する説明書」のうちV-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に基づき複数の基準地震動 S s の床応答スペクトル (T. M. S. L. ) を包絡する模擬地震波の時刻歴波形, 床応答スペクトルを図 7-3, 図 7-4 に示す。

- MS トンネル室 BOP の設置高さを含む上下の原子炉建屋 T. M. S. L.
- 基準地震動 S s 8 波及び建屋影響評価を考慮するばらつきケースを包絡
- 加振目標の包絡スペクトルは減衰定数  % で設定



(1) 水平 (NS) 方向



(2) 水平 (EW) 方向



(3) 鉛直方向

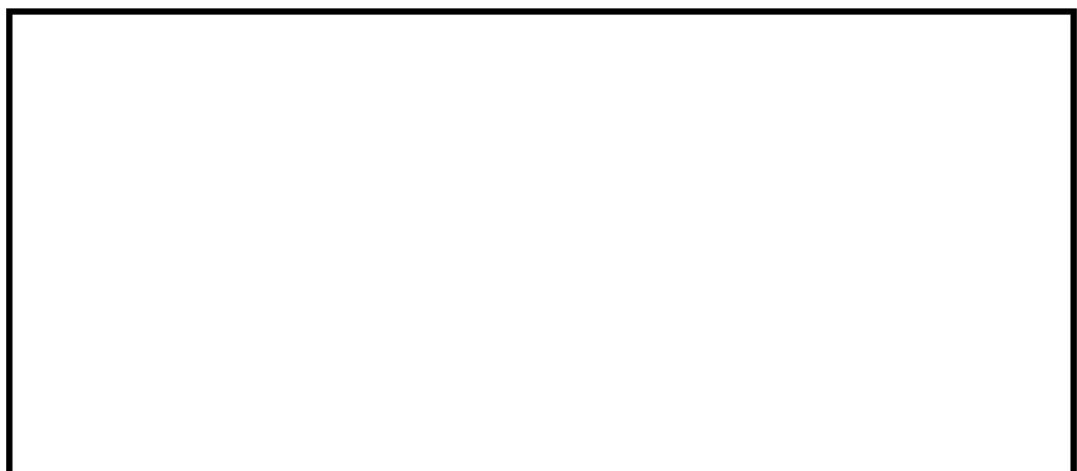
図 7-3 模擬地震波の時刻歴波形



(1) 水平 (NS) 方向



(2) 水平 (EW) 方向



(3) 鉛直方向

図 7-4 模擬地震波の応答スペクトル (減衰定数  %)

### 7.5 MSトンネル室BOPの加振方法

MSトンネル室BOP試験体を，弾性設計用地震動  $S_d$  相当及び基準地震動  $S_s$  相当の加振波によって加振し，MSトンネル室BOPが開放しないことを確認する。

#### (1) 試験概要

加振試験用枠体に固定した MS トンネル室 BOP を振動台に設置し，表 7-3 に示す加振波で加振し，試験後，MS トンネル室 BOP スリット部の亀裂の有無を目視により確認する。

### 7.6 計測機器

計測機器の取付け位置を図 7-5 に示す。

#### a. 加速度計

メーカー名称：, 型番名称：

設置場所：加振試験用枠体脚部

メーカー名称：, 型番名称：

設置場所：MS トンネル室 BOP 中央部

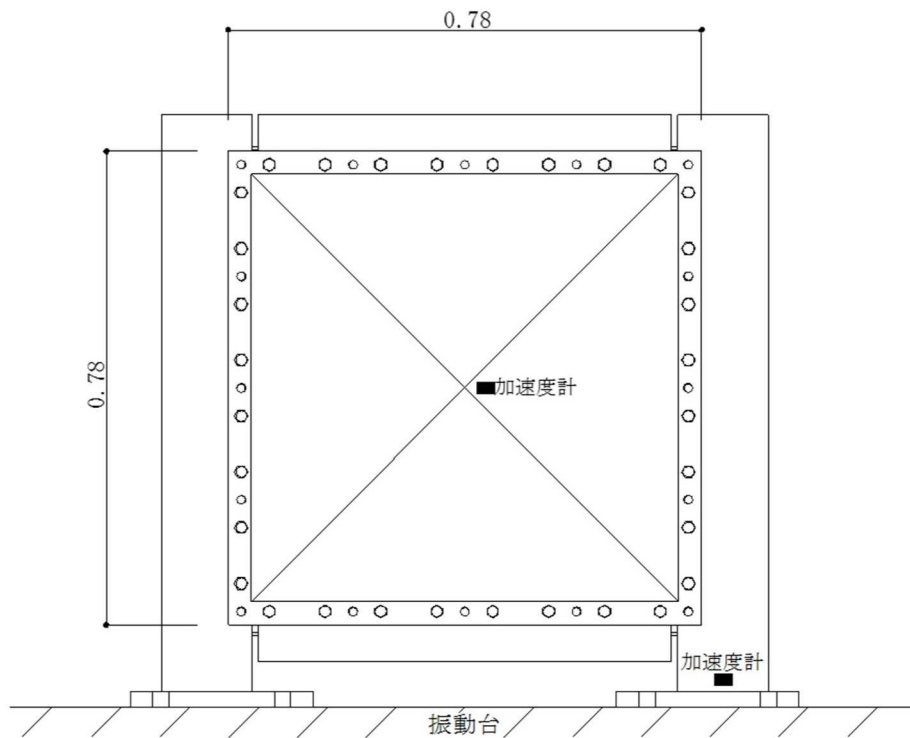


図7-5 計測機器取付け位置図（立面図）

(1) 測定内容

加速度，亀裂の有無

(2) 測定方法

図7-3に示す位置に加速度計を取付け，加振時の加速度を時刻歴で測定し，サンプリング時間は， 秒程度とする。

試験時の状況を動画撮影する。

(3) 確認項目

本試験における確認項目を以下に示す。

- ・各加振波におけるMSトンネル室BOPの加速度
- ・MSトンネル室BOPの開放の有無

(4) 判定基準

本試験における判定基準を以下に示す。

- ・MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m<sup>2</sup>）以下であること。
- ・亀裂が生じていないこと。

## ブローアウトパネル機能確認試験結果について

試験要領書に従って実施した試験結果は以下のとおり。

## 1. 燃料取替床ブローアウトパネル固有値確認結果

ハンマーによる打撃及び常時微動による燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロBOP」という。）中央の加速度波形から高速フーリエ変換により算定したフーリエスペクトルを図1-1に示す。 Hz近傍に大きなピークがあり、オペフロBOPの1次振動数である。



図1-1 オペフロBOPの固有振動数測定結果



2. オペフロBOP作動確認結果

(1) 開放機能確認結果

設計条件としたクリップ数18個（幅約37.5mmを□個，幅約75mmを□個）の実機大モックアップ試験体に対して，4体の油圧ジャッキによる開放試験を実施し，オペフロBOPが設計条件（差圧3.43 kPa以下）の荷重にて開放することを確認した（試験体1）。同条件にて再試験を実施し再現性を確認した（試験体2,3）。試験結果を表2-1に，各油圧ジャッキの反力（オペフロBOPの抗力）を図2-1から図2-6に示す。

表2-1 オペフロBOPの開放荷重試験結果

項目	試験日	測定値 (kN)	許容値 (kN) (3.43 kPa 相当値)	判定	備考 相当する差圧値 (kPa)
試験体1	2019/7/2	□	52.2	○	□
試験体2	2019/7/4			○	
試験体3	2019/7/5			○	

試験体1

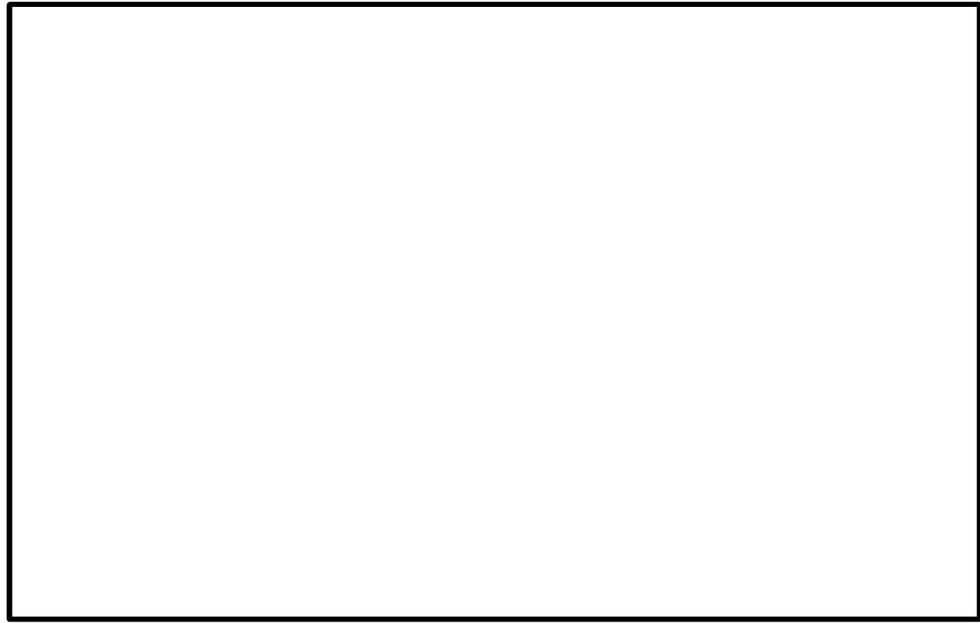


図 2-1 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

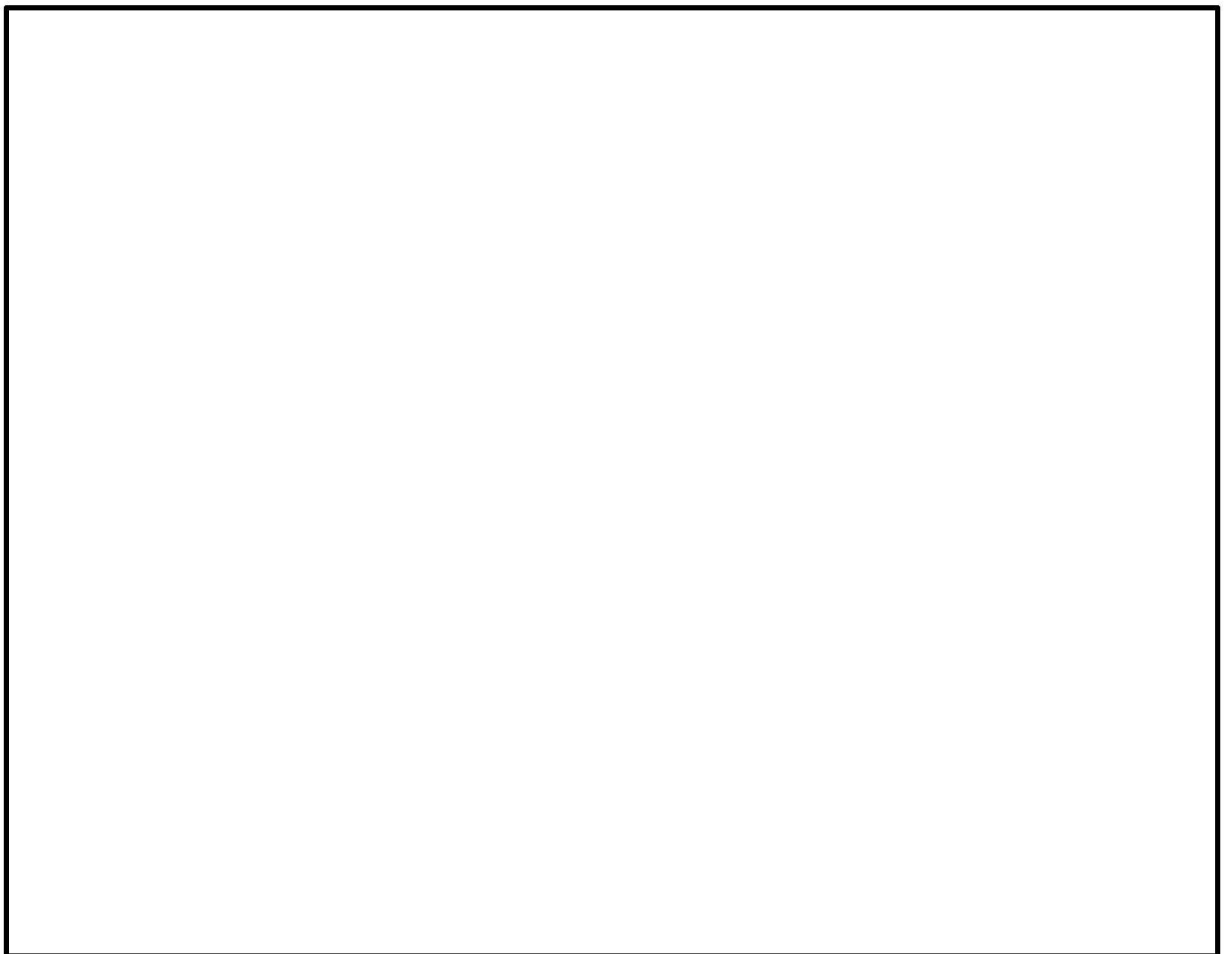


図 2-2 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果 (試験体 1)

試験体 2

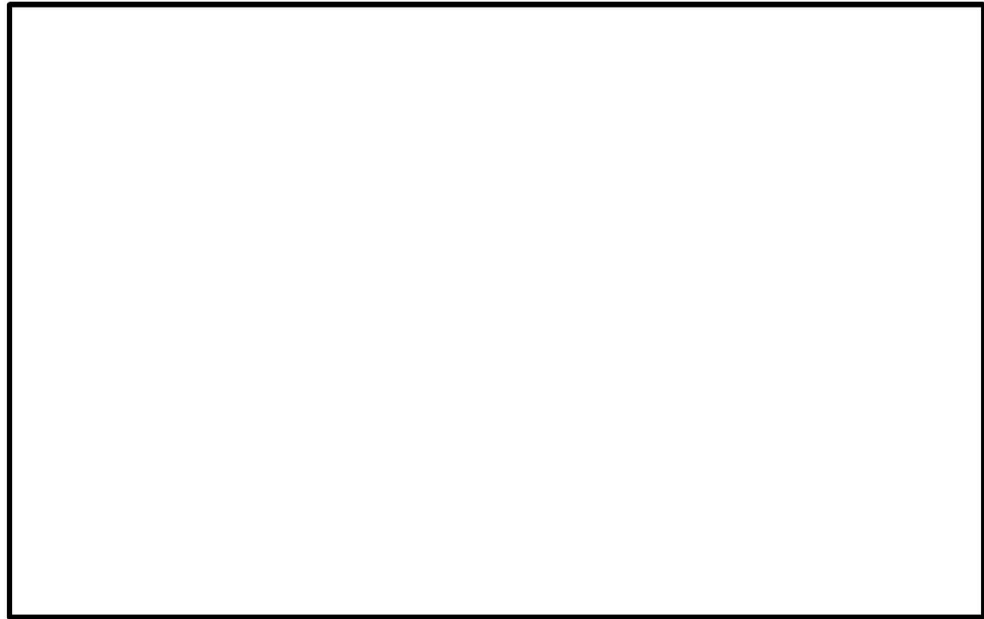


図 2-3 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

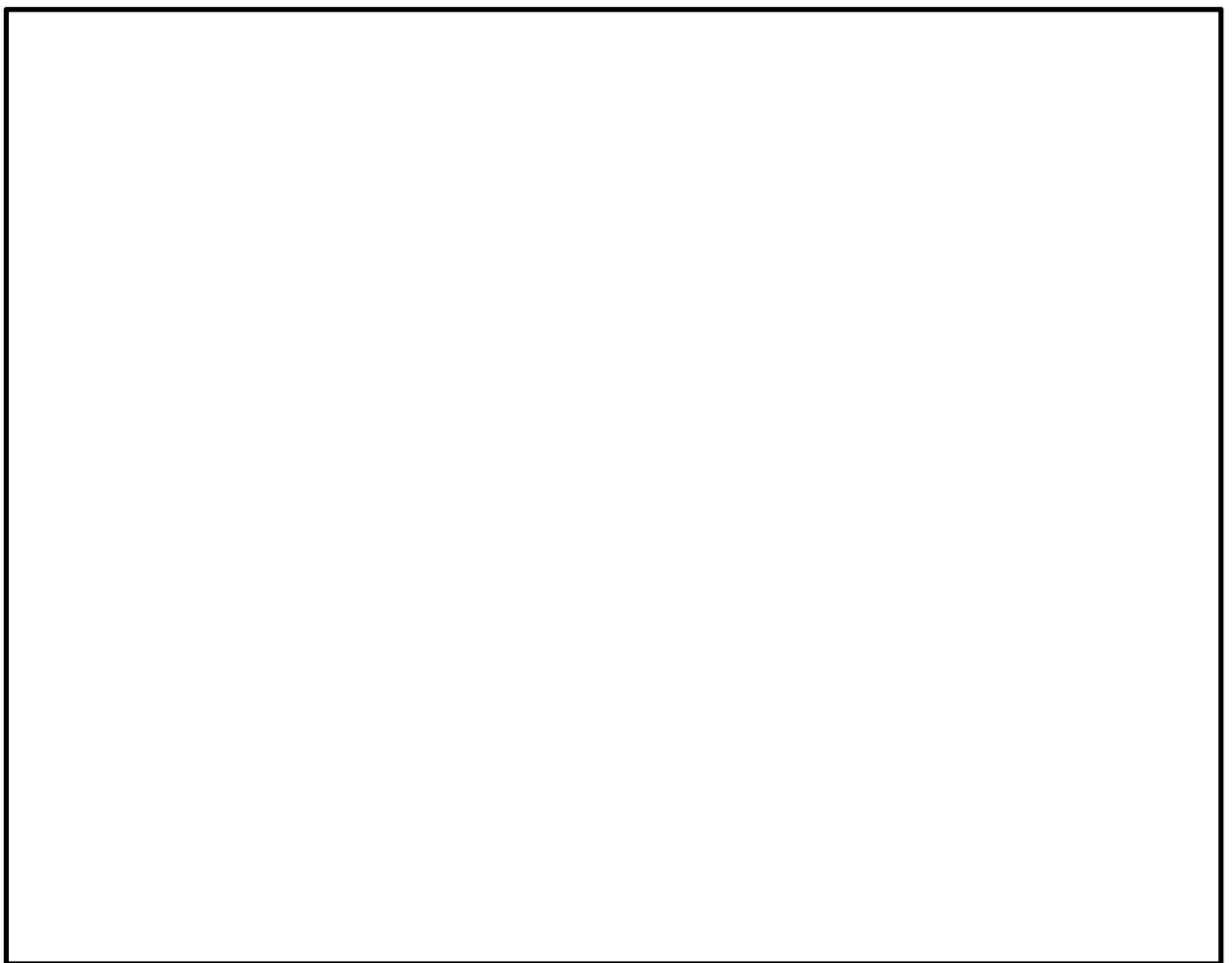


図 2-4 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果 (試験体 2)

試験体 3

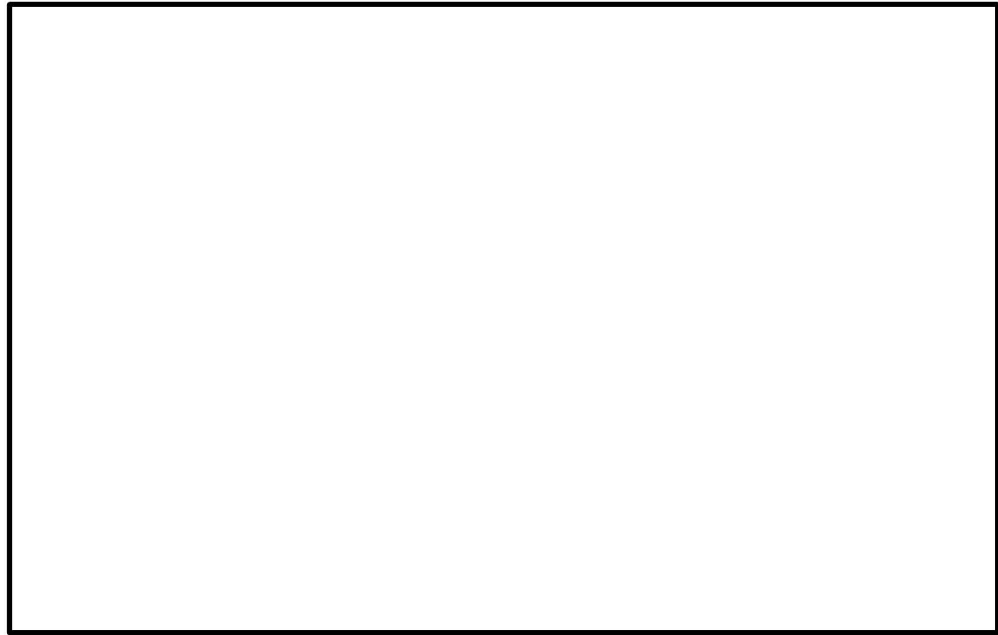


図 2-5 油圧ジャッキの荷重合計と変位図

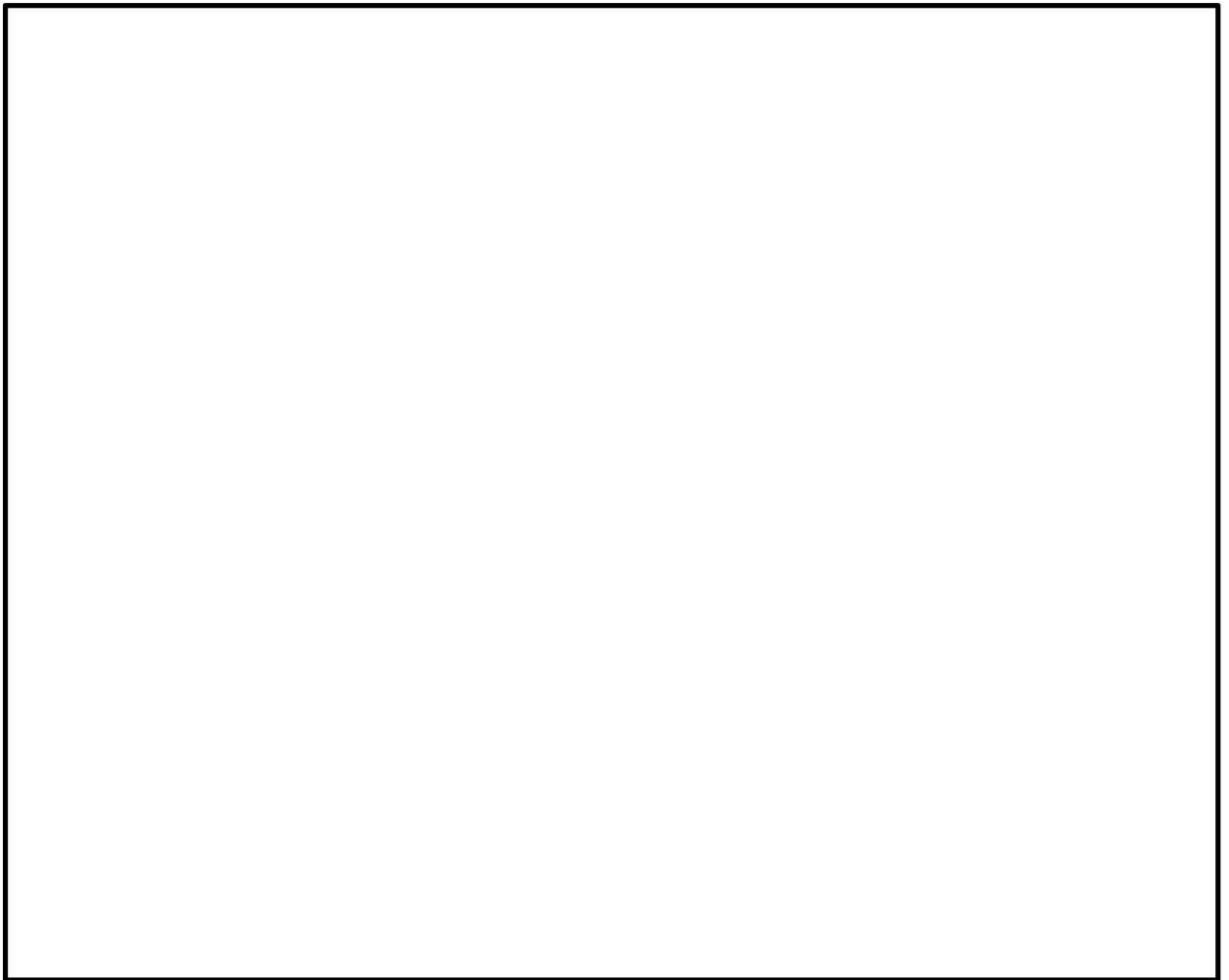


図 2-6 各油圧ジャッキの荷重と変位測定結果 (試験体 3)

(2) 閉維持確認結果

(1)開放機能確認結果より、オペフロBOPの開放荷重はS d 荷重相当値（約19.2 kN）以上であることを確認した。評価結果を表2-2に示す。

S d 相当荷重値約19.2 kNの根拠は、以下のとおり。

オペフロBOP重量 : 1500 kg

オペフロBOP設置場所 (T. M. S. L. 49.7 m) 応答水平震度 : 1.30\*

注記\* : オペフロBOPの固有振動数 (  Hz ) を考慮した震度

S d 相当荷重値 :  $1500 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 \times 1.30 = 19110 \text{ N} \approx 19.2 \text{ kN}$

表2-2 オペフロBOPの耐震性能確認結果

項目	試験日	測定値 (kN)	判定値(kN) (S d 荷重相当)	判定
試験体1	2019/7/2	<input type="text"/>	19.2	○
試験体2	2019/7/4			○
試験体3	2019/7/5			○

3. 実機大モックアップ試験の開放挙動に関する考察

実機大モックアップ試験では、ジャッキ荷重は3回のピーク荷重を形成した。最初のピークは上部クリップの開放、2回目のピークはシール材の破断、最後のピークは下部クリップの開放によるものである。

シール材は使用環境により経年劣化するものであることから、接着力及びパネル開放時のシール材の負担荷重は変化することが考えられるが、開放荷重へのシール材の影響は小さいため、設計差圧以下で開放することには影響を与えないものと想定される。

また、上部クリップの負担荷重に比べ、下部クリップの負担荷重と下部の摩擦荷重が大きいため、上部クリップと下部クリップの開放に差が生じているが、取付け枠からパネル本体が完全に脱落することを確認している。

#### 4. MSトンネル室BOP作動確認結果

##### (1) 開放機能確認結果

試験装置に設置したMSトンネル室BOPに対して、加圧による破裂試験を実施し、MSトンネル室BOPが設計差圧 (9.81 kPa以下) の圧力にて開放することを確認した。試験結果を表4-1に示す。

表4-1 MSトンネル室BOPの破裂試験結果

項目	試験日	測定値 (kPa)	許容値 (kPa)	判定
試験体1	2019/3/27	7.74	9.81	○
試験体2		7.85		○
試験体3		7.53		○

(2) 閉維持確認結果

V-2-9-3-1-2「主蒸気系トンネル室ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」による S d 荷重の算定値は0.00509kN/m<sup>2</sup>、加振試験による S d 荷重の測定値は [ ] kN/m<sup>2</sup>であり、MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m<sup>2</sup>）以下であることを確認した。

また、S s 荷重の算定値は0.0109kN/m<sup>2</sup>、加振試験による S s 荷重の測定値は [ ] kN/m<sup>2</sup>～ [ ] kN/m<sup>2</sup>であり、MSトンネル室BOPの開放荷重（5.89 kN/m<sup>2</sup>）以下であることを確認した。

評価結果を表4-2及び表4-3に示す。

ここで、S d 地震相当及びS s 地震相当の模擬地震波による加振試験において、試験体脚部に設置した加速度計による計測結果が目標値（S d 包絡条件、S s 包絡条件）を上回ることを確認した。表4-4及び表4-5に最大加速度値、図4-1及び図4-2に加速度応答スペクトルの計測結果を示す。目標応答を計測結果が一部下回っているが、ランダム波加振により、ラプチャーパネル中央に設置した加速度計で計測した1次固有振動数は試験体1で [ ]、試験体2で [ ]、試験体3で [ ] であることから固有振動数帯での計測結果は、目標応答を上回っていることを確認した。

表4-2 MSトンネル室BOPの耐震性能確認結果（S d）

項目	試験日	算定値(kN/m <sup>2</sup> ) (S d 荷重相当)	測定値 (kN/m <sup>2</sup> )	判定値(kN/m <sup>2</sup> ) (設計開放荷重)	判定
試験体1	2019/5/23	0.00509	[ ]	5.89	○
試験体2	2019/5/24				○
試験体3	2019/5/27				○

表4-3 MSトンネル室BOPの耐震性能確認結果（S s）

項目	試験日	算定値(kN/m <sup>2</sup> ) (S s 荷重相当)	測定値 (kN/m <sup>2</sup> )	判定値(kN/m <sup>2</sup> ) (設計開放荷重)	判定
試験体1	2019/5/23	0.0109	[ ]	5.89	○
試験体2	2019/5/24				○
試験体3	2019/5/27				○



表 4-4 MS トンネル室 BOP の加振試験結果 (試験体脚部加速度, S d 地震相当)

(a) 試験体 1

方向	S d 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(b) 試験体 2

方向	S d 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(c) 試験体 3

方向	S d 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

表 4-5 MS トンネル室 BOP の加振試験結果 (試験体脚部加速度, S s 地震相当)

(a) 試験体 1

方向	S s 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(b) 試験体 2

方向	S s 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○

(c) 試験体 3

方向	S s 包絡条件 (m/s <sup>2</sup> )	計測結果 (m/s <sup>2</sup> )	判定結果
面外方向			○
面内方向			○
上下方向			○



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-1(1) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S d 地震相当, 試験体 1, 減衰定数 )



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-1(2) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S<sub>d</sub>地震相当, 試験体 2, 減衰定数 )



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-1(3) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S<sub>d</sub>地震相当, 試験体 3, 減衰定数 )



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-2(1) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S<sub>s</sub>地震相当, 試験体 1, 減衰定数 )



(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-2 (2) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S<sub>s</sub>地震相当, 試験体 2, 減衰定数 )

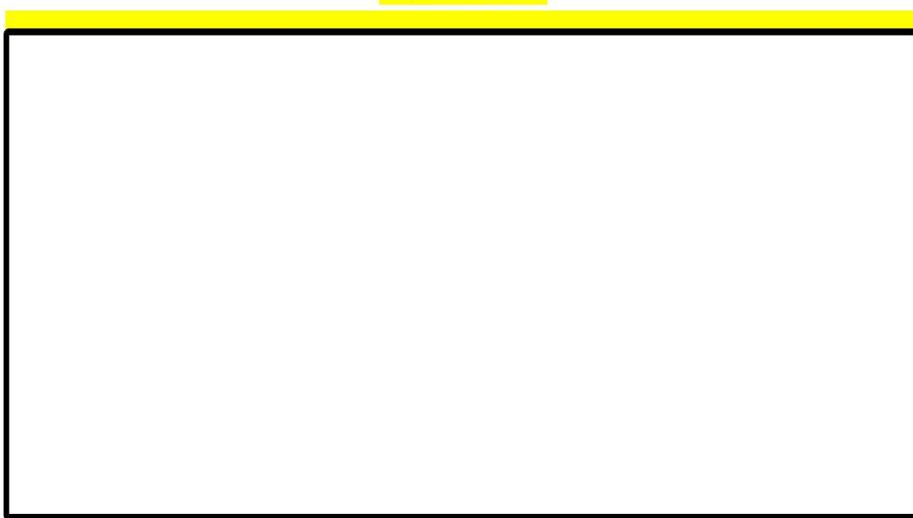




(a) 面外方向



(b) 面内方向



(c) 上下方向

図 4-2 (3) MS トンネル室 BOP の加振試験結果

(試験体脚部加速度応答スペクトル, S<sub>s</sub>地震相当, 試験体 3, 減衰定数 )

## 燃料取替床ブローアウトパネル開放時の設計基準事故時被ばく評価への影響について

### 1. 概要

燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）は、二次格納施設のバウンダリとしての機能を有しているため、弾性設計用地震動  $S_d$  で開放しない設計としている。ここでは、設計基準事故事象のうち、二次格納施設バウンダリ機能の健全性を前提としている事故事象に対して、当該事象と地震との組合せ時期を考慮し、弾性設計用地震動  $S_d$  を超える地震にてパネルが開放した場合の公衆への被ばく影響を確認する。

設計基準事故のうち「燃料集合体の落下」及び「原子炉冷却材喪失」では、放射性物質は非常用ガス処理系で処理された後、主排気筒から放出される想定としているが、オペフロ BOP が開放した場合は、二次格納施設の負圧維持ができなくなり、オペフロ BOP 開放部から直接大気中に放射性物質が放出される可能性がある。

本評価では、事故発生から 30 日後\*以降に地震によりオペフロ BOP が開放されると想定したときの設計基準事故時の被ばく評価への影響について以下のとおり確認した。

注記\*： 設計基準事故の発生確率を  $10^{-3}$ /年、弾性設計用地震動  $S_d$  の発生確率を  $10^{-3}$ /年、重畳を考慮すべき基準を  $10^{-7}$ /年（航空機落下、JEAG4601）とし、重畳を考慮すべき時期として、 $10^{-7}/(10^{-3} \times 10^{-3}) = 0.1$  年（約 36.5 日）から 30 日を仮定

### 2. 放出量評価

評価対象プラントを柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機に設定し、事故発生から 30 日後までは設置許可申請書添付書類十に記載される評価に基づき放出量評価を行い、事故発生 30 日後からは非常用ガス処理系を経由せずに原子炉建屋から直接大気中に放射性物質が放出されると仮定し、非常用ガス処理系によるよう素除去効果及び換気率を見込まずに、放射性物質が地上放出されるものとして放出量を評価する。

評価対象事故は、非常用ガス処理系に期待しており、オペフロ BOP の開放によって影響が生じる事象である「原子炉冷却材喪失」を選定する。具体的な放出量評価方法については別紙 1 に示す。

なお、燃料集合体の落下の放出率は、別紙 1 の別図 1 に示すように事故発生から約 20 日ではほぼゼロであり、事故発生から 30 日後以降のオペフロ BOP 開放の影響はない。

放出量の評価結果を第 1 表に示す。

第1表 原子炉冷却材喪失時の放出量の評価結果

項目	評価期間	原子炉冷却材喪失	
		希ガス (0.5MeV 相当値) (Bq)	よう素 (I-131 換算値) (Bq)
設置許可申請書 における放出量	無限期間	約 $3.5 \times 10^{11}$	約 $6.4 \times 10^6$
オペフロ BOP 開放を 想定した放出量	事故発生から 30 日後まで	約 $3.3 \times 10^{11}$	約 $5.9 \times 10^6$
	事故発生から 30 日後以降	約 $1.7 \times 10^{10}$	約 $6.0 \times 10^9$
	合計	約 $3.5 \times 10^{11}$	約 $6.0 \times 10^9$

3. 大気拡散条件

大気拡散評価は、「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に基づき行う。

なお、オペフロ BOP の開放を想定した評価において、オペフロ BOP の開放状態に係らず、保守的に実効放出継続時間 1 時間及び地上放出を仮定して評価する。

大気拡散評価の結果を第2表に示す。

第2表 原子炉冷却材喪失時の相対濃度及び相対線量の評価結果

項目		実効放出 継続時間 (h)	相対濃度及び相対線量		評価方位
設置許可申請書 における拡散条件		110	D/Q (Gy/Bq)	$4.2 \times 10^{-20}$	ENE
		360	$\chi$ /Q (s/m <sup>3</sup> )	$6.3 \times 10^{-7}$	ESE
オペフロ BOP 開放 を想定し た拡散条 件	事故発生から 30 日後まで	1	D/Q (Gy/Bq)	$2.5 \times 10^{-19}$	ESE
		1	$\chi$ /Q (s/m <sup>3</sup> )	$2.5 \times 10^{-5}$	
	事故発生から 30 日後以降	1	D/Q (Gy/Bq)	$2.5 \times 10^{-19}$	
		1	$\chi$ /Q (s/m <sup>3</sup> )	$2.5 \times 10^{-5}$	

#### 4. 被ばく評価結果

オペフロ BOP が開放した場合の設計基準事故時の被ばく評価結果を第 3 表に示す。オペフロ BOP 開放を考慮した評価結果は、設計基準事故の基準である 5mSv を十分に下回る結果となっており、設計基準事故に係る被ばく評価の結論に影響はない。

なお、設置許可申請書の本文十号に記載されている設計基準事故で最も線量が高くなる主蒸気管破断の線量（約  $5.0 \times 10^{-2}$  mSv）と比べても低い値となっていることを確認している。

第 3 表 原子炉冷却材喪失時の被ばく評価結果

項目		実効線量 (mSv)	
設置許可申請書 添付書類十記載値	実効線量合計*1	約 $1.5 \times 10^{-5}$	
オペフロ BOP 開放を 想定した場合	事故発生から 30 日後まで	希ガス	約 $8.4 \times 10^{-5}$
		よう素	約 $1.4 \times 10^{-6}$
	事故発生から 30 日後以降	希ガス	約 $4.2 \times 10^{-6}$
		よう素	約 $1.4 \times 10^{-3}$
	直接・スカイシャイン線*2	約 $4.0 \times 10^{-7}$	
合計	約 $1.5 \times 10^{-3}$		

注記\*1：希ガスによる外部被ばく、よう素による内部被ばく及び直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による外部被ばくの合計。

\*2：評価上、オペフロ BOP 開放後は原子炉建屋内の放射性物質は大気中へ放出されるため、原子炉建屋からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線の影響は無くなるが本評価においては考慮しない。

## オペフロ BOP の開放を考慮した放出量評価について

「燃料集合体の落下」及び「原子炉冷却材喪失」の放出量評価においては非常用ガス処理系によるよう素除去効果及び換気率を考慮して式①及び式②により放出量評価を行っている。

オペフロ BOP が開放した場合には、非常用ガス処理系によるよう素除去効果及び換気率が期待できなくなる。このため、別表 1 及び別表 2 に示す条件の違いを考慮して、オペフロ BOP 開放以降の放出量の評価した。

## 1. 燃料集合体の落下

燃料集合体の落下におけるオペフロ BOP 開放時の放出量のうち、オペフロ BOP 開放前の放出量は、次式により求める。

ただし、燃料集合体の落下の放出率は別図 1 に示すように約 20 日で $\approx 0$ であり、事故発生から 30 日後以降のオペフロ BOP 開放の影響はない。

$$Q_1^i = \int_0^{t_{BOP}} \lambda_{LSGTS} \cdot (1 - f_{SGTS}) \cdot Q_{R/B1}^i(t) dt$$

$$= \frac{\lambda_{LSGTS} \cdot (1 - f_{SGTS}) \cdot \frac{F}{DF} \cdot Q_P^i}{\lambda_R^i + \lambda_{LSGTS}} \cdot \left(1 - e^{-(\lambda_R^i + \lambda_{LSGTS}) \cdot t_{BOP}}\right) \cdot \dots \cdot (a)$$

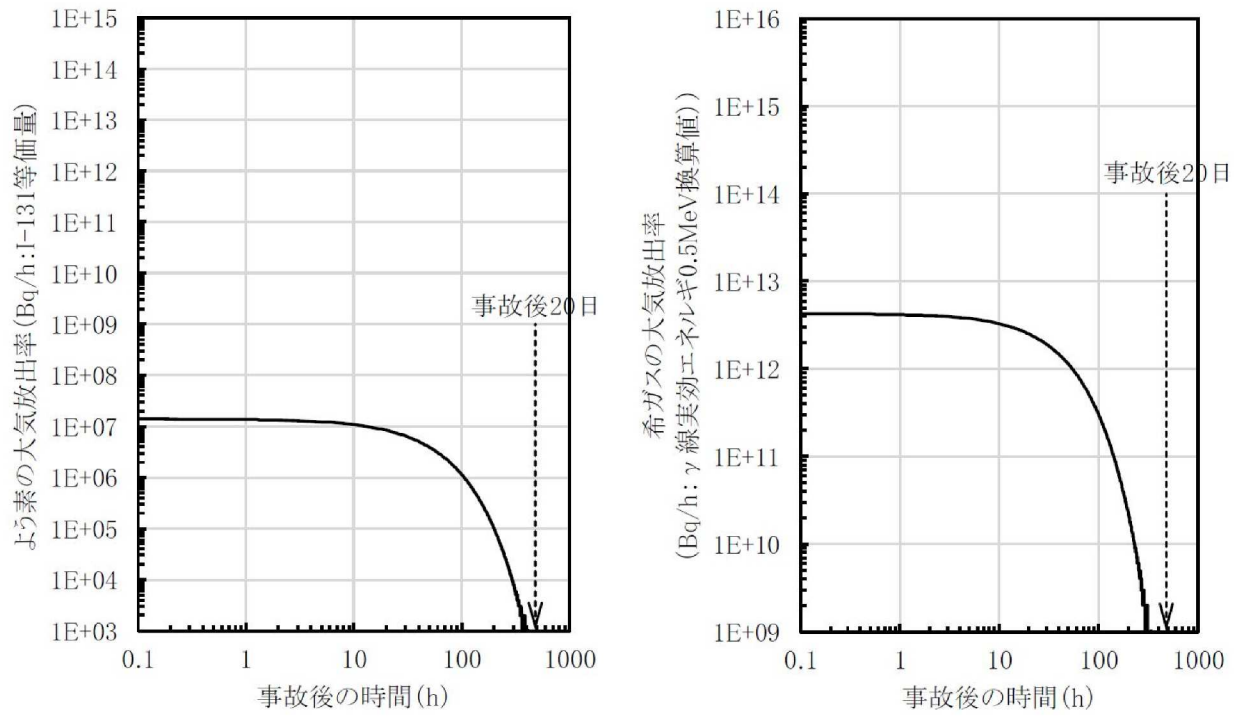
$$Q_{R/B1}^i(t) = \frac{F}{DF} \cdot Q_P^i \cdot e^{-(\lambda_R^i + \lambda_{LSGTS}) \cdot t}$$

ここで、

- $Q_1^i$  : オペフロ BOP 開放前に大気中に放出される核分裂生成物の放出量 (Bq)
- $\lambda_{LSGTS}$  : 非常用ガス処理系による原子炉建屋内空気の換気率 (0.5/d)
- $f_{SGTS}$  : 非常用ガス処理系フィルタのよう素除去効率 (-)
- $Q_{R/B1}^i(t)$  : オペフロ BOP 開放前の原子炉建屋内の核分裂生成物の存在量 (Bq)
- $F$  : 核分裂生成物の存在割合 (-)
 

希ガス	$F = 1$
有機よう素	$F = \text{全よう素中の有機よう素の割合}$
無機よう素	$F = \text{全よう素中の無機よう素の割合}$
- $DF$  : 無機よう素のプール水による除去係数 ( $DF = 500$ )  
(希ガス及び有機よう素の場合は  $DF = 1$ )
- $Q_P^i$  : 事故直前に燃料ギャップ部に存在する核分裂生成物の量 (Bq)
- $\lambda_R^i$  : 核種  $i$  の崩壊定数 ( $s^{-1}$ )





別図1 燃料集合体の落下におけるよう素及び希ガスの大気放出率の時間推移





別表2 原子炉冷却材喪失時の非常用ガス処理系等の評価条件

	設置申請書添付書類十 における評価条件	オペフロ BOP の開放を 考慮した場合の評価条件
$C_W^i$	$1.3 \times 10^3 \text{Bq/g}$ (I-131)	同左
$M$	296ton	同左
$q_f^i$	$3.7 \times 10^{13} \text{Bq}$ (I-131)	同左
$g$	希ガス $g = 100\%$ 有機よう素 $g = 4\%$ 無機よう素 $g = 96\%$	同左
$F_2$	50%	同左
$V_A$	$13310 \text{m}^3$	同左
$V_W$	$3580 \text{m}^3$	同左
$P$	希ガス $P = 1$ 有機よう素 $P = 1$ 無機よう素 $P = 100$	同左
$\lambda_{LPCV}$	0~1 時間 : $0.6\%/d$ 1 時間以降 : $0.3\%/d$	同左
$\lambda_{LSGTS}$	0.5 回/d	無限大
$f_{SGTS}$	99.99%	0%
$\lambda_R^i$	(例) 希ガス (Xe-133) : $0.131 (d^{-1})$ よう素 (I-131) : $0.086 (d^{-1})$	同左

## ブローアウトパネル閉止装置の配置と構造について

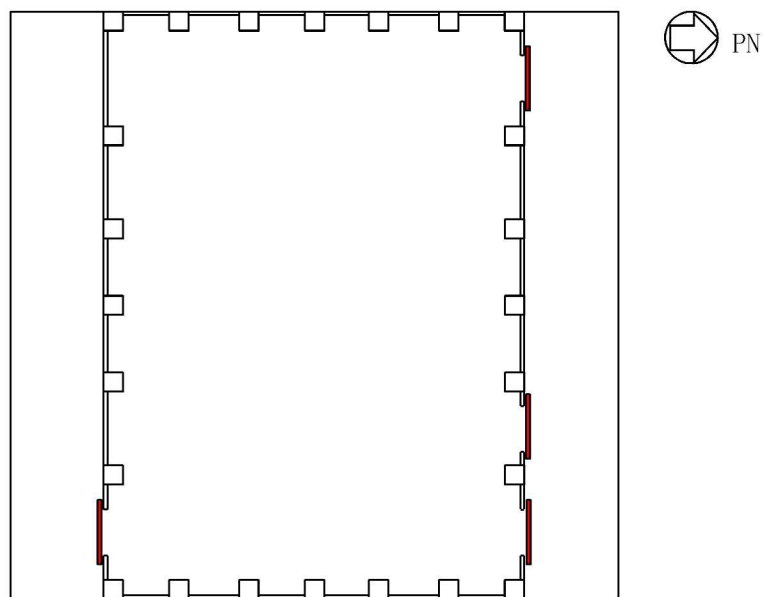
## 1. 概要

燃料取替床ブローアウトパネル閉止装置（以下「オペフロ BOP 閉止装置」という。）は、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則及び規則の解釈の第 74 条で要求される設備であり、燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）が開放した状態において、炉心の著しい損傷が発生した場合に中央制御室にとどまる運転員を過度の被ばくから防護するため、オペフロ BOP が開放した後の躯体の開口部を閉止し、原子炉建屋の放射性物質の閉じ込め機能を確保するために設置する。

## 2. 設置位置及び台数

## 2.1 オペフロ BOP 閉止装置

オペフロ BOP 閉止装置は、原子炉建屋原子炉区域 4 階中間床に計 4 台設置する。設置位置を図 2-1 に示す。



原子炉建屋原子炉区域地上 4 階中間床 概略平面図

— : (オペフロ BOP 閉止装置 4 台)

図 2-1 オペフロ BOP 閉止装置設置位置図

### 3. 閉止装置の構造

#### 3.1 オペフロ BOP 閉止装置

オペフロ BOP 閉止装置は、電動機の回転をハンガーローラに取り付けられているチェーンにより開閉方向の動作に変換することで扉本体の開閉が可能な構造としており、リミットスイッチにより扉本体の開閉状態を中央制御室にて確認できる構造としている。

扉本体は、ハンガーローラを介して上部レールに吊り下げられた構造としており、全開状態においては、テーパブロックとプッシュローラにより扉本体をフレームに押し付けて固定する構造としている。また、全閉状態においては、テーパブロックとプッシュローラにより扉本体をパッキンに押し付けることにより高い気密性を確保する構造としている。

扉本体の開閉は、ガイドローラとガイドレールにより面外方向をガイドする構造となっている。

また、扉は、開状態又は閉状態での地震による扉の慣性力の伴う過度な荷重が、チェーン等の駆動系に付加されチェーンが破損することを防ぐ目的と、扉閉状態で地震により扉が開方向に移動し扉の気密性能に影響を与えないようにする目的で、扉の面内方向の動きを拘束する門により扉を固定する構造としている。

なお、既設のオペフロBOPが開放する際に、オペフロBOP閉止装置は干渉しない構造とする。

オペフロ BOP 閉止装置の構造概要図を図 3-1 に、駆動機構概要図を図 3-2 に、手動操作概念図を図 3-3 に示す。

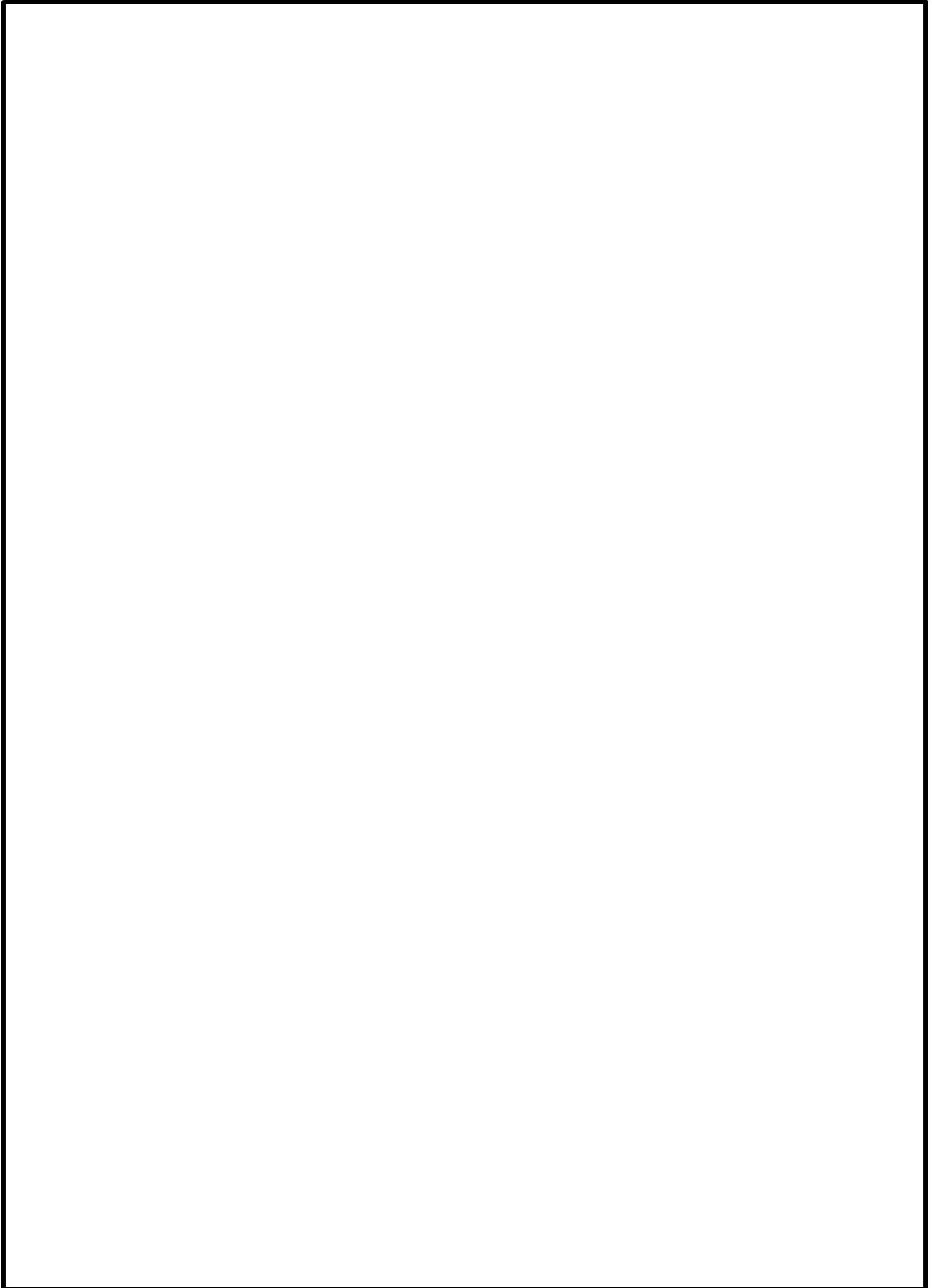


図 3-1 オペフロ BOP 閉止装置の構造概要図

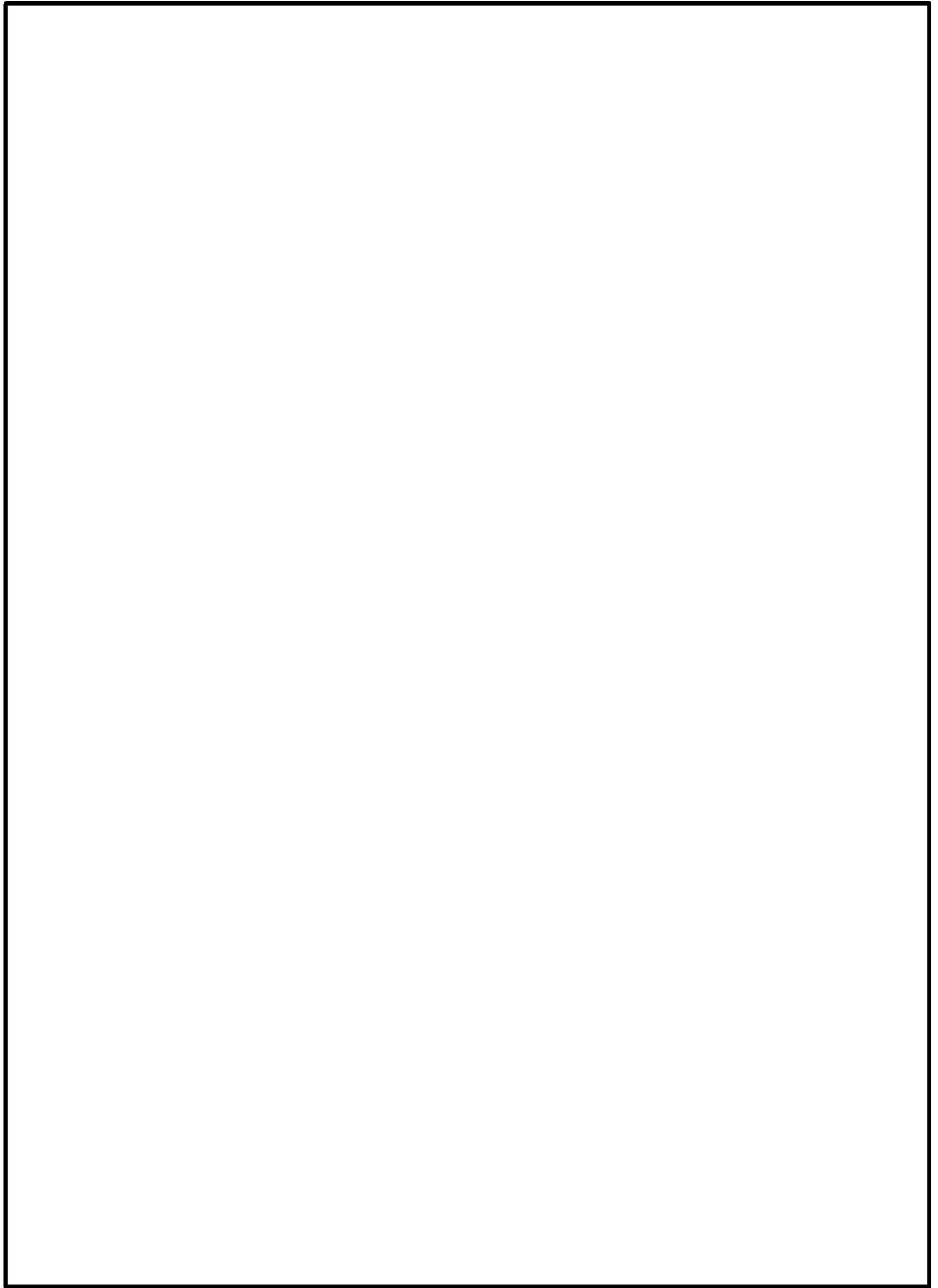


図 3-2 オペフロ BOP 閉止装置の駆動機構概要図

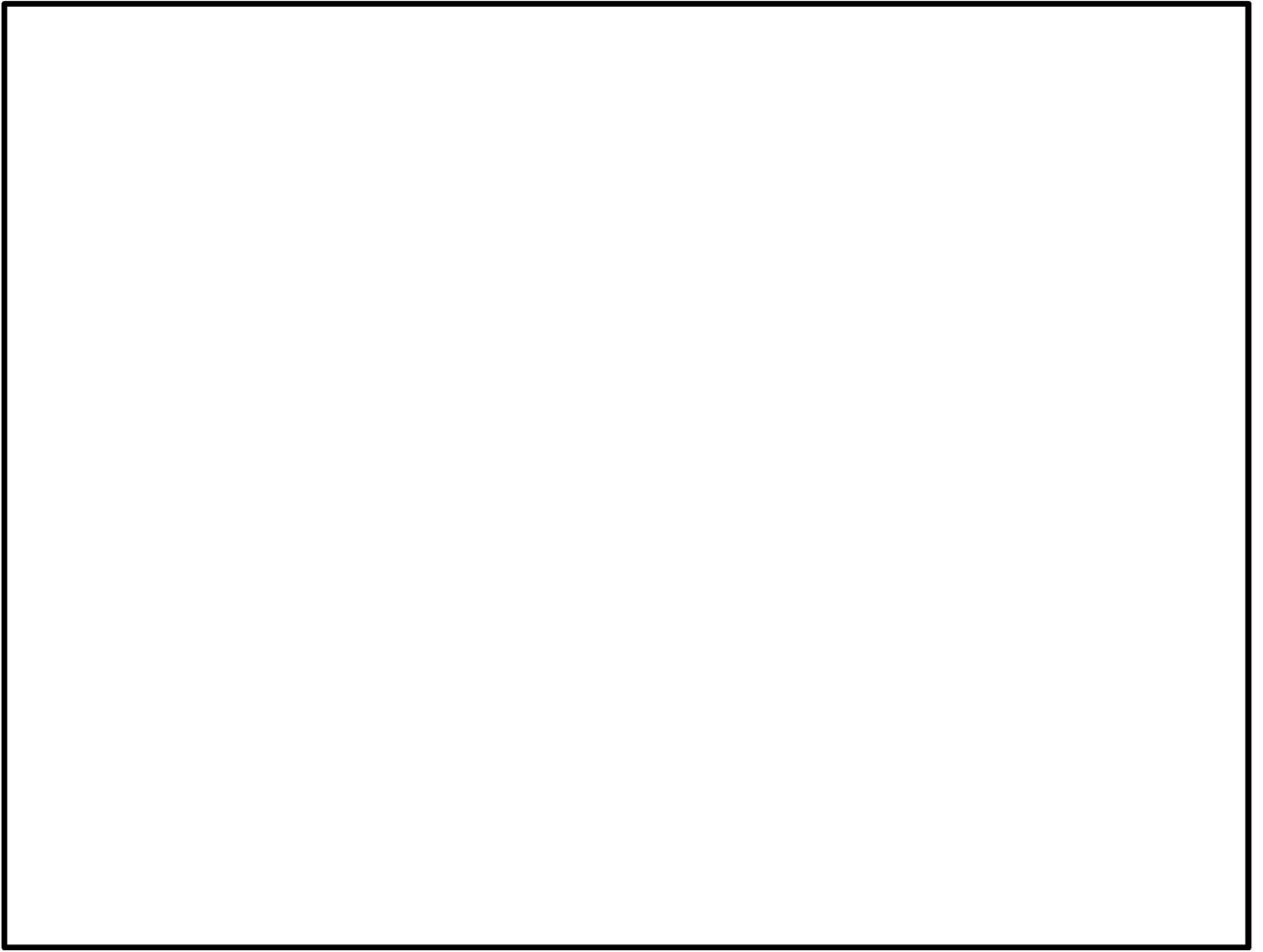


図 3-3 オペフロ BOP 閉止装置の手動操作概念図