

本資料のうち、枠囲みの内容は  
商業機密の観点から公開できま  
せん。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-01-0230-1_改0
提出年月日	2021年5月25日

補足-230-1 発電用原子炉施設の蒸気タービン，ポンプ等の損壊に  
伴う飛散物による損傷防護に関する補足説明資料

2021年5月

東北電力株式会社

## 補足説明資料目次

1. 配管破損防護対策について
2. ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価について
3. ディーゼル駆動補機及びタービン駆動補機の評価対象並びに過速度トリップ設定値について

## 1. 配管破損防護対策について

## 目 次

1. STANDARD REVIEW PLAN 3.6.2 DETERMINATION OF RUPTURE LOCATIONS AND DYNAMIC EFFECTS ASSOCIATED WITH THE POSTULATED RUPTURE OF PIPING ..	1-1
2. パイプホイップレストレイントについて .....	1-5
3. 障壁について .....	1-6
4. 原子炉冷却材圧力バウンダリの配管破損による損傷防護について .....	1-8

1. STANDARD REVIEW PLAN 3.6.2 DETERMINATION OF RUPTURE LOCATIONS AND DYNAMIC EFFECTS ASSOCIATED WITH THE POSTULATED RUPTURE OF PIPING

「原子力発電所配管破損防護設計技術指針 J E A G 4 6 1 3 - 1998」(日本電気協会)(以下「J E A G 4 6 1 3」という。)&「STANDARD REVIEW PLAN 3.6.2 DETERMINATION OF RUPTURE LOCATIONS AND DYNAMIC EFFECTS ASSOCIATED WITH THE POSTULATED RUPTURE OF PIPING(SRP3.6.2 R3)」(U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION)(以下「SRP3.6.2」という。)&の配管破損想定位置及び防護設計に関する記述の比較を表 1-1 に示す。

表 1-1 J E A G 4 6 1 3 と SRP3.6.2 の比較

J E A G 4 6 1 3	SRP3.6.2	備考
<p>基本的な考え方  <u>原子炉炉冷却材圧力バウンダリに属するオーステナイト系ステンレス鋼管が、もし破損したとしても、原子炉を安全に停止させ、外部に放射性物質の放散などの影響を及ぼさないよう設計することが防護設計の考え方である。</u></p>	<p>I. AREAS OF REVIEW            Title 10 of the <i>Code of Federal Regulations</i> (10 CFR) Part 50, “Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities,” Appendix A, “General Design Criteria for Nuclear Power Plants,” General Design Criterion (GDC) 4, “Environmental and Dynamic Effects Design Bases,” requires, in part, that structures, systems, and components (SSCs) important to safety be designed to accommodate the effects of postulated accidents, including appropriate protection against the dynamic effects of postulated pipe ruptures.</p>	<p>SRP3.6.2では、安全上重要な設備が、配管破損を含む想定される事故により損傷しないように設計する必要があると記載されており、J E A G 4 6 1 3 の記載と同義である。なお、SRP3.6.2には配管の材質を限定する記載なし。</p>

J E A G 4 6 1 3	SRP3. 6. 2	備考
<p>配管破損想定位置</p> <p>(1) ターミナルエンド</p> <p>(2) 運転状態 I, II 及び (1/3) S<sub>i</sub>地震荷重に対して次のいずれかの条件を満たす点</p> <p>a. <math>S_n &gt; 2.4S_m</math>, <math>c_a &gt; 2.4S_m</math></p> <p>b. <math>S_n &gt; 2.4S_m</math>, <math>c_a &gt; 2.4S_m</math></p> <p>c. 疲れ累積係数 <math>&gt; 0.1</math></p>	<p>SRP3. 6. 2</p> <p>&lt;BTP3-4 R2&gt; Postulation of Pipe Breaks in Areas Other Than Containment Penetration</p> <p>(a) At terminal ends.</p> <p>(b) At intermediate locations where the maximum stress range* as calculated by Eq. (10) and either Eq. (12) or Eq. (13) exceeds 2.4 S<sub>m</sub>.</p> <p>(c) At intermediate locations where the cumulative usage factor exceeds 0.1.</p> <p>* : For those loads and conditions for which Level A and Level B stress limits have been specified in the design specification (including the operating basis earthquake).</p> <p>(ii) <u>Fluid System Piping in Containment Penetration Areas. Breaks and cracks need not be postulated in those portions of piping from containment wall to and including the inboard or outboard isolation valves, provided they meet the design criteria of the ASME Code, Section III, Subarticle NE-1120, and the following additional design criteria:</u></p> <p>(a) <u>The maximum stress range between any two load sets (including the zero load set) should not exceed 2.4 S<sub>m</sub> and should be</u></p>	<p>SRP3. 6. 2はBTP3-4を参照しているため、BTP3-4の記載と比較</p> <p>差異なし。</p> <p>BTP3-4におけるEq. (10)はS<sub>n</sub>, Eq. (12)はS<sub>e</sub>, Eq. (13)はS<sub>n</sub>'の算出式であり、J E A G 4 6 1 3との差異なし。</p> <p>差異なし。</p> <p>BTP3-4では、<u>格納容器壁と内側隔離弁又は外側隔離弁の間の配管については、クライテリアを満足していれば、破損やき裂を想定する必要がないと規定されている。</u></p>

J E A G 4 6 1 3	SRP3. 6. 2	備考
	<p>calculated* by Eq. (10) in ASME Code, Section III, NB-3653. If the calculated maximum stress range of Eq. (10) exceeds 2.4 Sm, the stress ranges calculated by both Eq. (12) and Eq. (13) in Paragraph ASME Code, Section III, NB-3653 should meet the limit of 2.4 Sm.</p> <p>(b) The cumulative usage factor should be less than 0.1.</p> <p>(c) The maximum stress, as calculated by Eq. (9) in ASME Code, Section III, NB-3652 under the loadings resulting from a postulated piping failure beyond these portions of piping, should not exceed 2.25 Sm and 1.8 Sy, except that following a failure outside containment, the pipe between the outboard isolation valve and the first restraint may be permitted higher stresses provided a plastic hinge is not formed and operability of the valves with such stresses is ensured in accordance with the criteria specified in SRP Section 3.9.3.</p>	

J E A G 4 6 1 3	SRP3. 6. 2	備考
<p>防護設計の実施 配管の破損に対して防護対象の機能を確保し、また配管破損による派生事象が安全評価上の「事故」の規模を上回らないように、防護設計は次の基本的な考え方に基つき行うものとする。</p> <p>i ) 破損想定配管と防護対象は、相互に距離を離す。</p> <p>ii ) 隔壁（建屋区画室等）を設ける。</p> <p>iii ) 配管破損による動的影響を防護対象に与えないため及び想定事象を緩和するため、パイプホップレストレイメント等の設置及び主要機器の支持設計を行う。</p>	<p>SRP3. 6. 1 R3&gt; I. AREAS OF REVIEW 1. Reviews of the general layout of high and moderate energy piping systems with respect to the plant arrangement criteria of Section B.1. of Branch Technical Position (BTP) 3-3. Three arrangement situations are covered by the criteria and all three may be encountered in a single plant. They are:</p> <p>A. Arrangements where protection of safety-related plant features is provided by separation of high and moderate energy systems from essential systems and components.</p> <p>B. Arrangements where protection of safety-related plant features is provided by enclosing either the high and moderate energy systems or the safety-related features in protective structures.</p> <p>C. Arrangements where neither separation nor protective enclosures are practical and special protective measures are taken to ensure the operability of safety-related features.</p>	<p>SRP3. 6. 2はSRP3. 6. 1を参照しているため、SRP3. 6. 1の記載と比較防護設計の要求事項に差異なし。</p> <p>差異なし。</p> <p>差異なし。</p> <p>SRP3. 6. 1では具体的な防護設計の内容は明記されていないが、安全機能の作動を保証する対策を行うことと記載されており、J E A G 4 6 1 3の記載と同義であり、差異なし。</p>



2. パイプホイップレストレイントについて

配管破損防護設計上の防護対象としてのパイプホイップレストレイントの構造例を図1-1に示す。

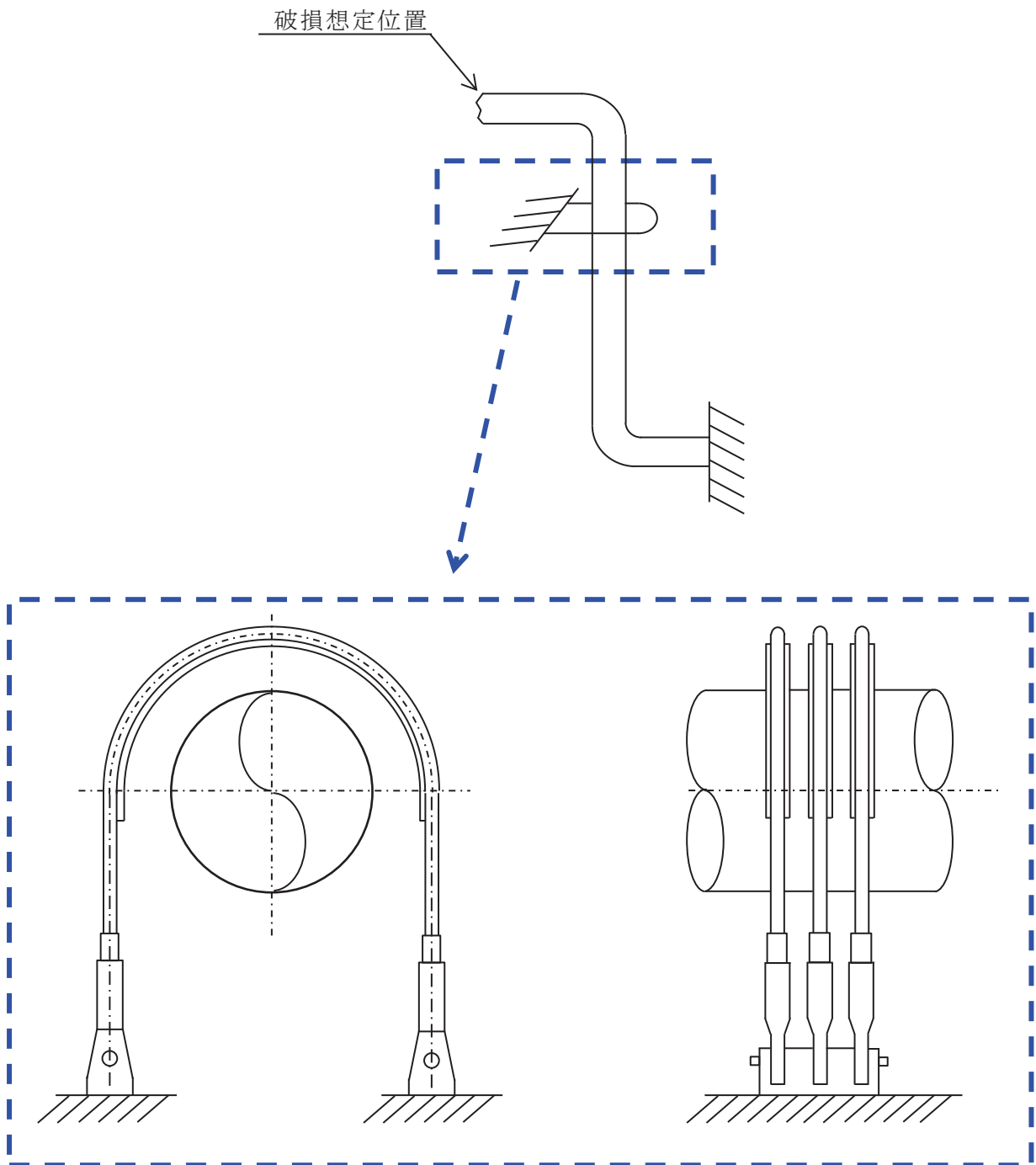


図 1-1 パイプホイップレストレイント構造図 (例)

### 3. 障壁について

原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲（RCPB 拡大範囲）となる主配管の配置及び障壁による区画を図 1-2 に示す。

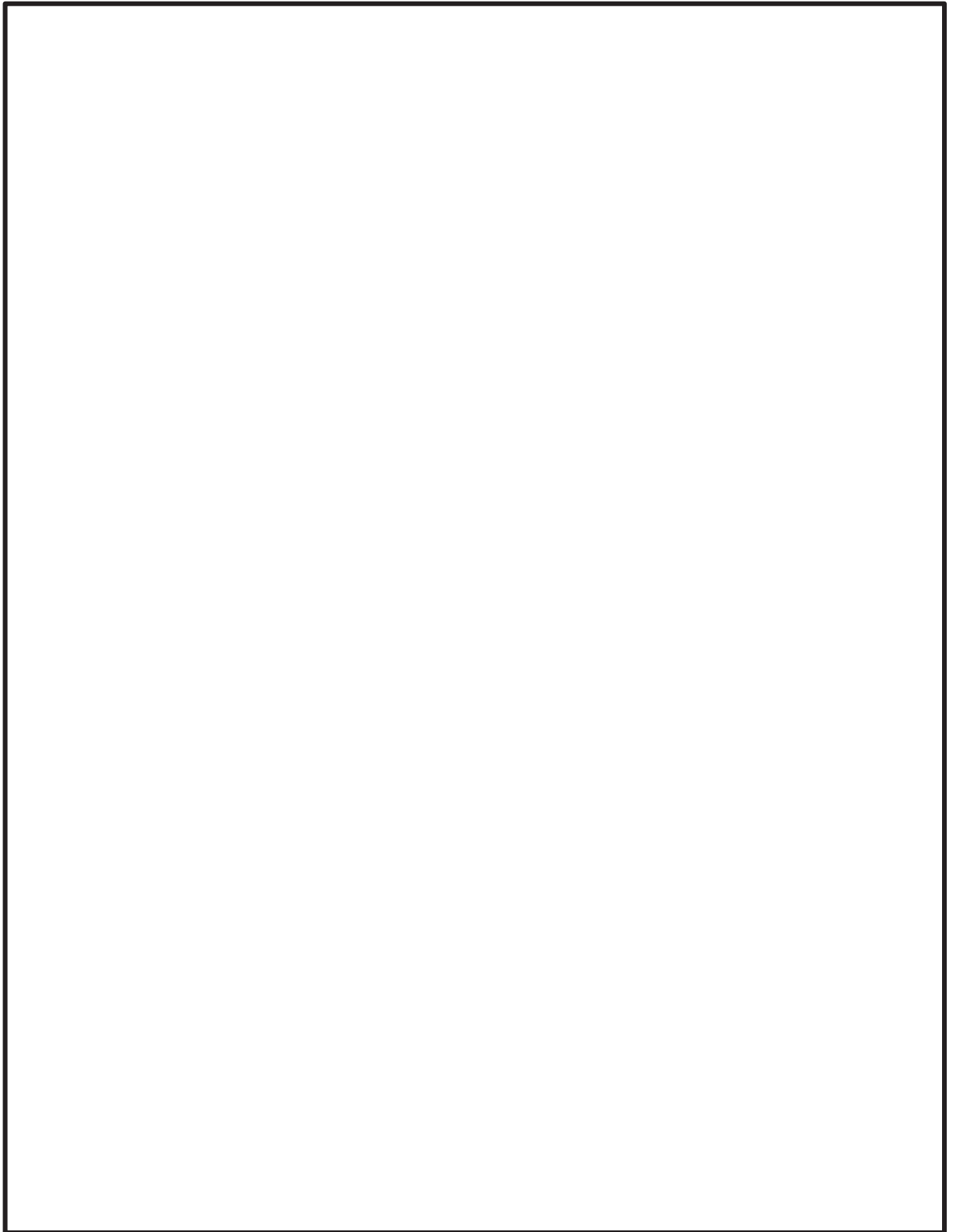


図 1-2 障壁による区画図(1)

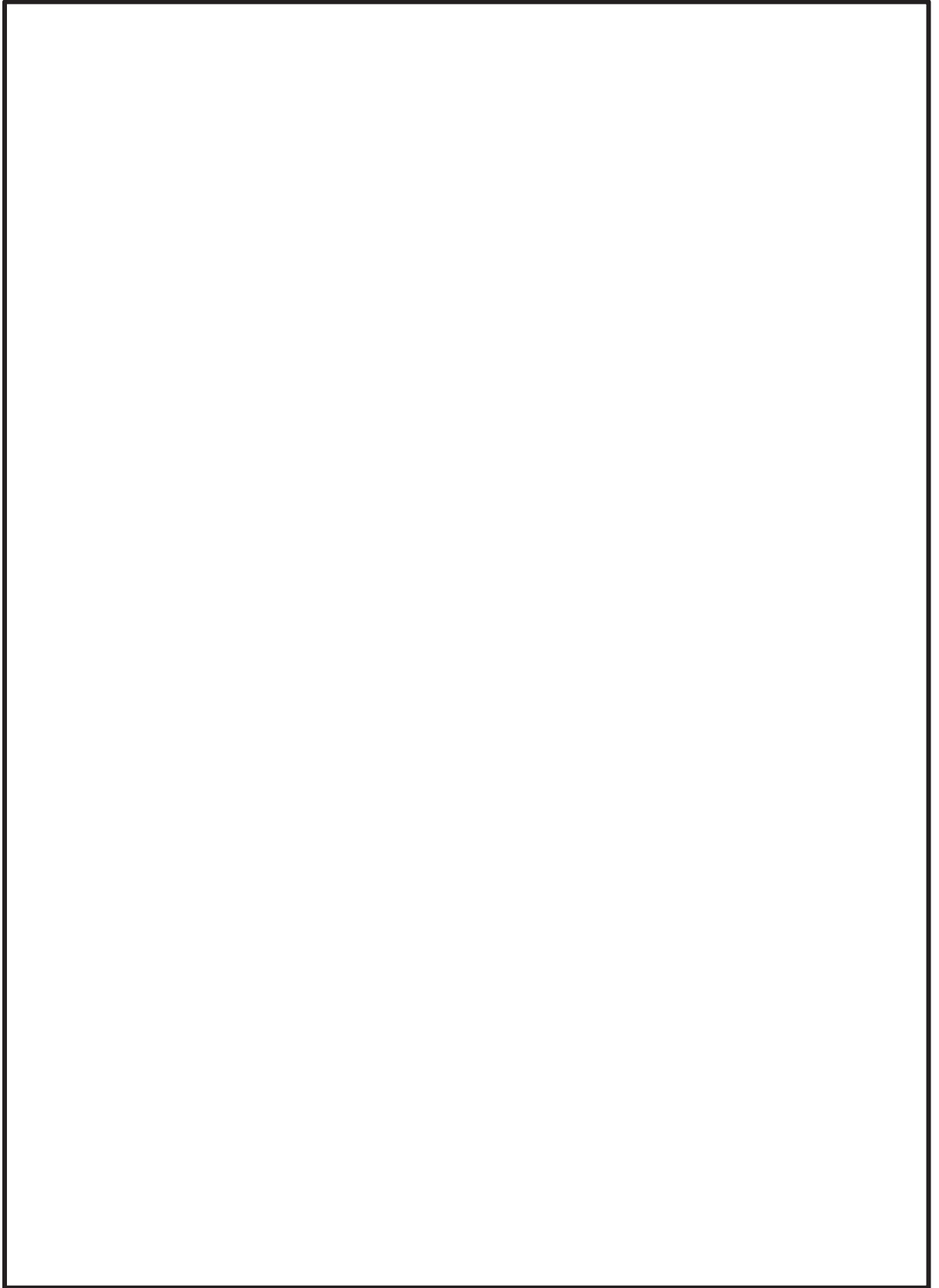


図 1-2 障壁による区画図(2)

## 4. 原子炉冷却材圧力バウンダリの配管破損による損傷防護について

### 4.1 概要

「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」（以下「技術基準規則」という。）第15条第4項及びその「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の解釈」（以下「解釈」という。）に基づき、配管の破損に伴う飛散物により発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計とすることについて説明するものである。

配管破損に関しては、設計基準対象施設に属する設備のうち新規基準において拡大となった原子炉冷却材圧力バウンダリ（以下「RCPB」という。）の範囲を除く、既存のRCPB範囲について配管破損に伴う飛散物により、発電用原子炉施設の安全性を損なわない設計を行うことについて説明する。

### 4.2 基本設計

設計基準対象施設に属する設備は、内部発生エネルギーの高い流体を内蔵する配管の破損に伴う飛散物により安全性を損なわない設計とする。

内部発生エネルギーの高い流体を内蔵する配管については、材料選定、強度設計に十分な考慮を払うとともに、SRP3.6.2に基づき配管破損を想定し、その結果生じる可能性のある動的影響により、発電用原子炉施設の機能が損なわれることのないよう配置上の考慮を払うこととする。

### 4.3 評価

発電用原子炉施設の安全性を損なうことが想定される内部発生エネルギーの高い流体を内蔵する配管の破損に伴う飛散物により、発電用原子炉施設の安全性を損なわないことを評価する。

#### 4.3.1 内部発生エネルギーの高い流体を内蔵する配管の破損による飛散物

##### 4.3.1.1 評価方針

高温高圧の流体を内包する原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する主配管のうち既存のRCPB範囲について、SRP3.6.2に基づき配管破損を想定し、以下の評価内容により評価し、設計上考慮する。なお、LBB概念は適用しない。

ただし、SRP3.6.2が参照している「STANDARD REVIEW PLAN BRANCH TECHNICAL POSITION 3-4 POSTULATED RUPTURE LOCATIONS IN FLUID SYSTEM PIPING INSIDE AND OUTSIDE CONTAINMENT (SRP BTP3-4 R2)」(U. S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION) に記載されているoperating basis earthquake については、弾性設計用地震動  $S_d$  の1/3と読み替える。

また、「2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code」(The American

Society of Mechanical Engineers) に関する内容については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版 (2007追補版含む)) <第 I 編 軽水炉規格> J S M E S N C 1 - 2005/2007」(日本機械学会) (以下「J S M E S N C 1」という。) に従うものとする。

#### 4.3.1.2 評価内容

評価内容においては、配管破損想定位置を考慮したうえで、防護対象を防護する。

##### (1) 防護対象

防護対象は、原子炉施設の異常状態において、この拡大を防止し、又は緩和する機能を有するもののうち、次のとおりとする。

- a. 原子炉停止系
- b. 炉心冷却に必要な工学的安全施設及び関連施設
- c. 原子炉冷却材喪失時に圧力障壁となり、かつ、放射性物質の放散に対する障壁を形成するよう設計された範囲の施設

##### (2) 配管破損想定位置

既存のRCPB範囲について、SRP3.6.2に基づき、ターミナル・エンド及び発生応力又は疲労累積係数が所定の値を超える点を配管破損想定位置とする。

- a. ターミナル・エンド
- b. 供用状態 A, B 及び  $(1/3) S_d$  地震荷重\* に対して次のいずれかの条件を満たす点

(a)  $S_n > 2.4 S_m$ , かつ,  $S_e > 2.4 S_m$

(b)  $S_n > 2.4 S_m$ , かつ,  $S_n' > 2.4 S_m$

ただし,  $S_n$  : J S M E S N C 1 PPB-3531の計算式に準じて計算した一次+二次応力。

$S_e$  : J S M E S N C 1 PPB-3536(6)の計算式に準じた熱膨張応力。

$S_n'$  : J S M E S N C 1 PPB-3536(3)の  $S_n$  の計算式に準じて計算した一次+二次応力。

$S_m$  : J S M E S N C 1 付録材料図表Part5表1に規定される材料の設計応力強さ。

- (c) 疲労累積係数  $> 0.1$

ただし, 上述する疲労累積係数は供用状態 A, B における疲労累積係数に  $(1/3) S_d$  ( $S_d-D1, S_d-D2, S_d-D3, S_d-F1, S_d-F2, S_d-F3$  及び  $S_d-N1$ ) 地震のみによる疲労累積係数を加算したものとする。

注記\* : S d (Sd-D1, Sd-D2, Sd-D3, Sd-F1, Sd-F2, Sd-F3 及び Sd-N1) 地震とは、添付書類 VI-2「耐震性に関する説明書」のうち、VI-2-1-1「耐震設計の基本方針」に示す弾性設計用地震動 Sd-D1, Sd-D2, Sd-D3, Sd-F1, Sd-F2, Sd-F3 及び Sd-N1 による動的地震力をいう。なお、弾性設計用地震動 S d の概要は、添付書類 VI-2「耐震性に関する説明書」のうち、VI-2-1-2「基準地震動 S s 及び弾性設計用地震動 S d の策定概要」に示す。

ただし、PCV貫通部については次の条件を満たすことで配管破損を想定しない。

c. 供用状態 A, B 及び (1/3) S d 地震荷重に対して次の条件を満たすこと。

(a)  $S_n \leq 2.4 S_m$ , または,  $S_e \leq 2.4 S_m$

(b)  $S_n \leq 2.4 S_m$ , または,  $S_n' \leq 2.4 S_m$

(c) 疲労累積係数  $\leq 0.1$

d. PCV貫通部について、破損想定位置における破断荷重によって、PCV貫通部の健全性維持範囲の配管に生ずる応力は J S M E S N C 1 PPB-3520 の計算式により計算した応力が 2.25 S m 及び 1.8 S y 以下であること。

ただし、S y : J S M E S N C 1 付録材料図表 Part5 表8に規定される材料の設計降伏点。

### (3) 防護対策の実施

配管破損による動的影響により、他の安全機能を有する構築物、系統及び機器が損傷しないように、必要に応じ以下の措置を講じる設計とする。

a. 配管破損想定位置と防護対象機器は、十分な隔離距離をとる。

b. 配管破損想定位置又は防護対象機器を障壁で囲む。

c. 上記のいずれかの対策がとれない場合、配管破損による動的影響に十分耐えるパイプホイッププレストレスト等を設ける。

#### 4.3.1.3 評価結果

既存のRCPB範囲における配管破損に関し、SRP3.6.2に基づき評価した結果、発生応力又は疲労累積係数が所定の値を超える箇所及び各配管におけるターミナル・エンドがあり、配管破損を想定する箇所があることを確認した。

既存のRCPB範囲における配管破損想定位置を表1-2に、各系統の配管鳥瞰図を図1-3から図1-16に示す。

これらの配管破損想定位置は必要な強度を有するパイプホイッププレストレストが設置されている又は設置されていない配管については、配管破損想

定位置と防護対象機器が十分な隔離距離がとられていることを確認した。したがって、配管の破損に伴う飛散物により発電用原子炉施設の安全性は損なわれない。

表 1-2 既存の RCPB 範囲における配管破損想定位置

対象		配管破損想定位置の有無		パイプホイップ レストレイント 設置の有無	破損想定位置 近傍の防護対 象設備の有無
系統名	モデル No.	ターミナル・ エンド	発生応力又は 疲労累積係数 が所定の値を 超える点		
原子炉冷却材 浄化系	CUW-001	有	無	無	無
復水給水系	FDW-001	有	有	有	—
高圧炉心 スプレイ系	HPCS-001	有	無	無	無
低圧炉心 スプレイ系	LPCS-001	有	無	無	無
主蒸気系	MS-001	有	有	有	—
	MS-002	有	無	有	—
	MS-003	有	有	有	—
	MS-004	有	有	有	—
原子炉再循環系	PLR-001	有	無	有	—
	PLR-002	有	無	有	—
残留熱除去系	RHR-001	有	無	無	無
	RHR-002	有	無	無	無
	RHR-003	有	無	無	無
	RHR-005	有	無	無	無





図 1-3 配管鳥瞰図（原子炉冷却材浄化系 CUW-001）



図 1-4 配管鳥瞰図（復水給水系 FDW-001）

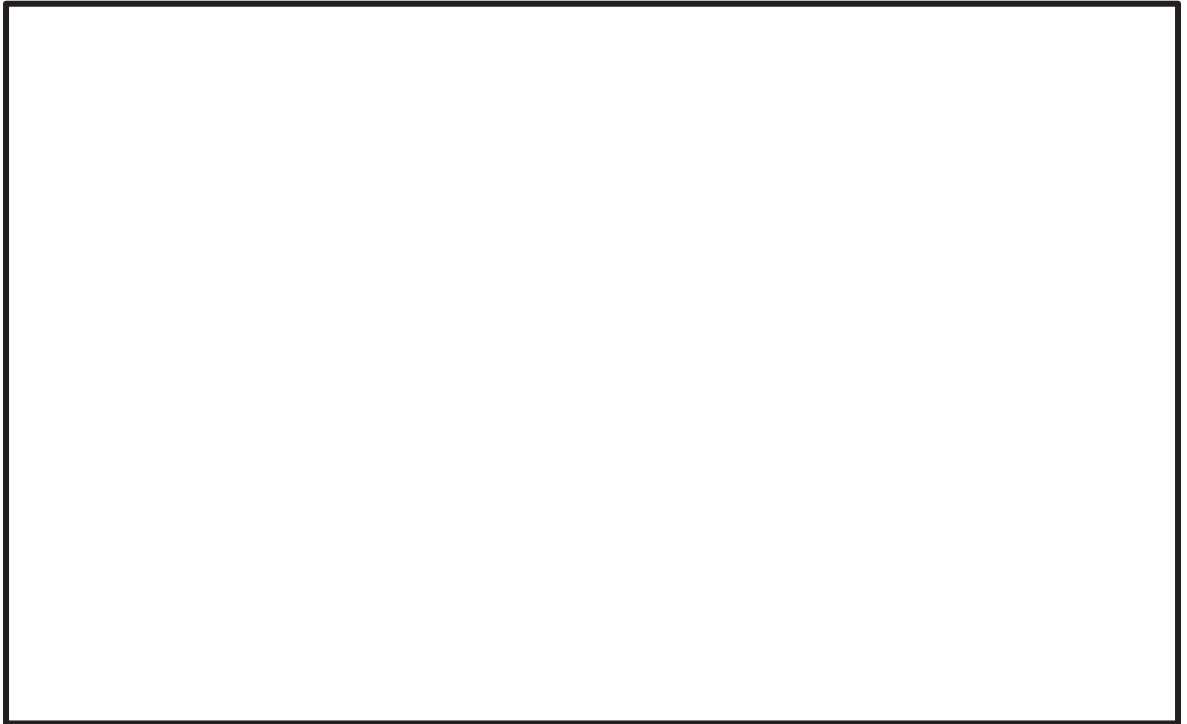


図 1-5 配管鳥瞰図（高圧炉心スプレイ系 HPCS-001）

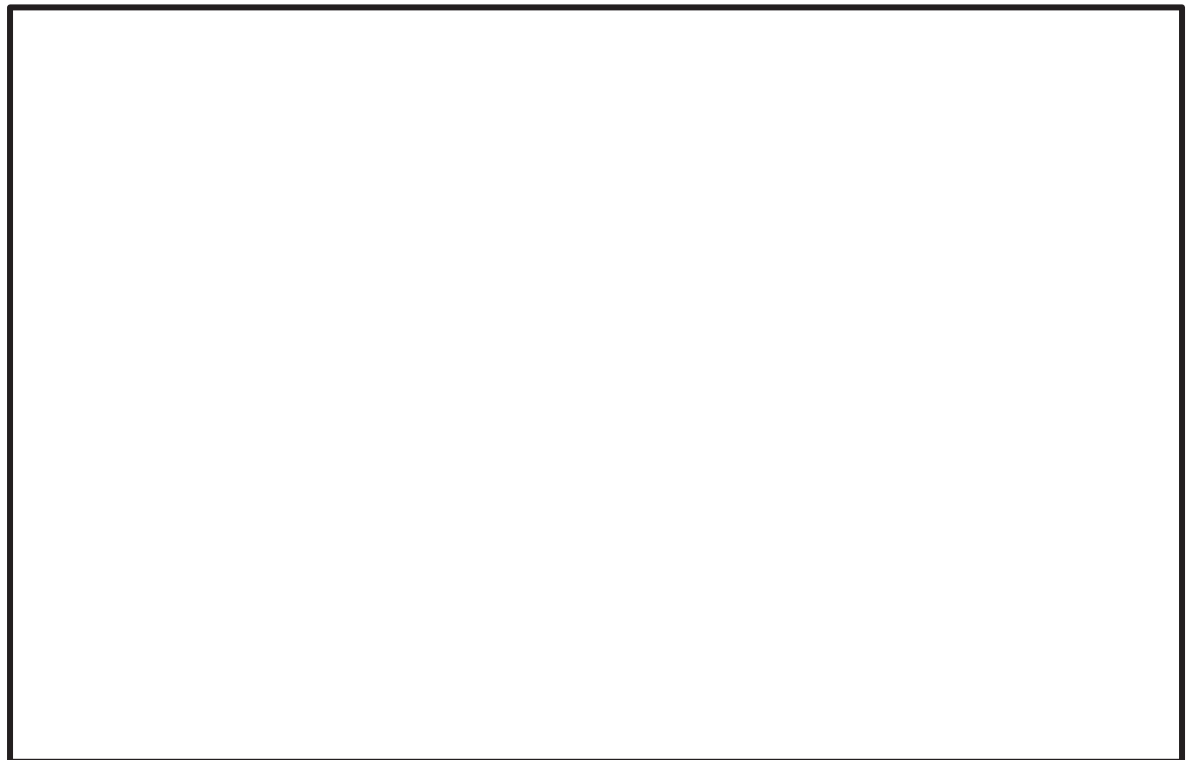


図 1-6 配管鳥瞰図（低圧炉心スプレイ系 LPCS-001）

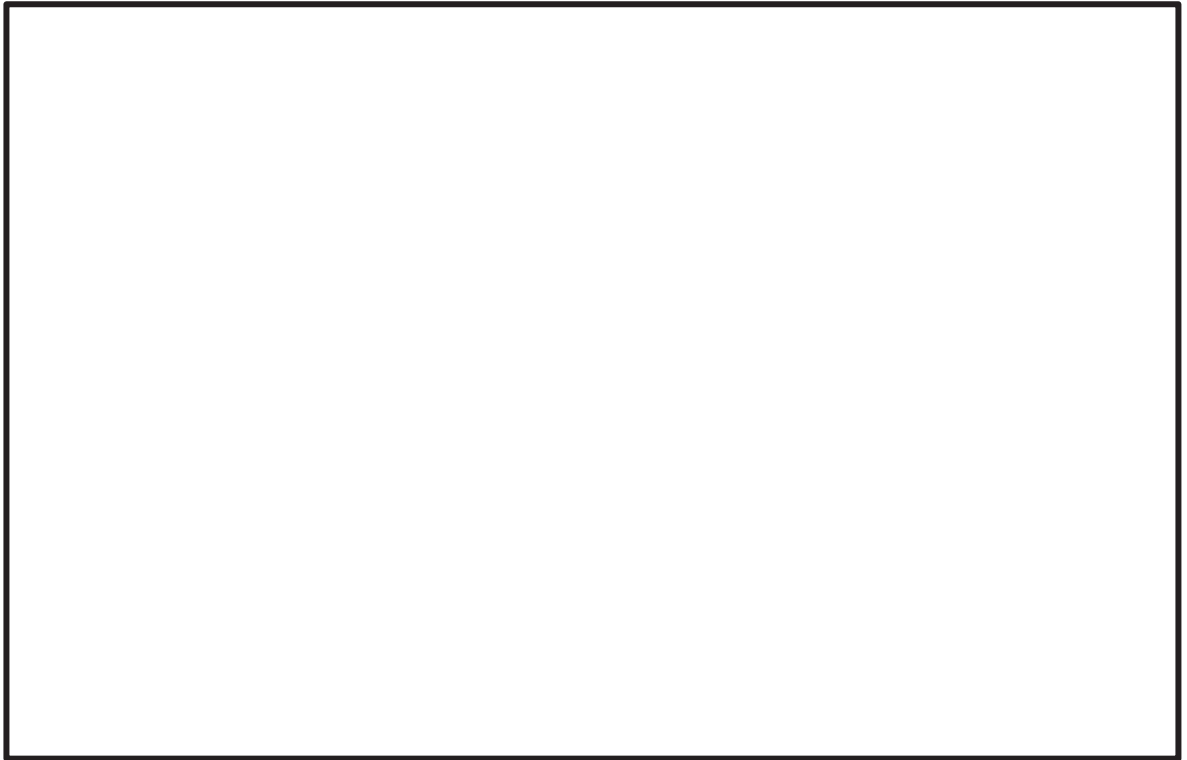


図 1-7 配管鳥瞰図（主蒸気系 MS-001）

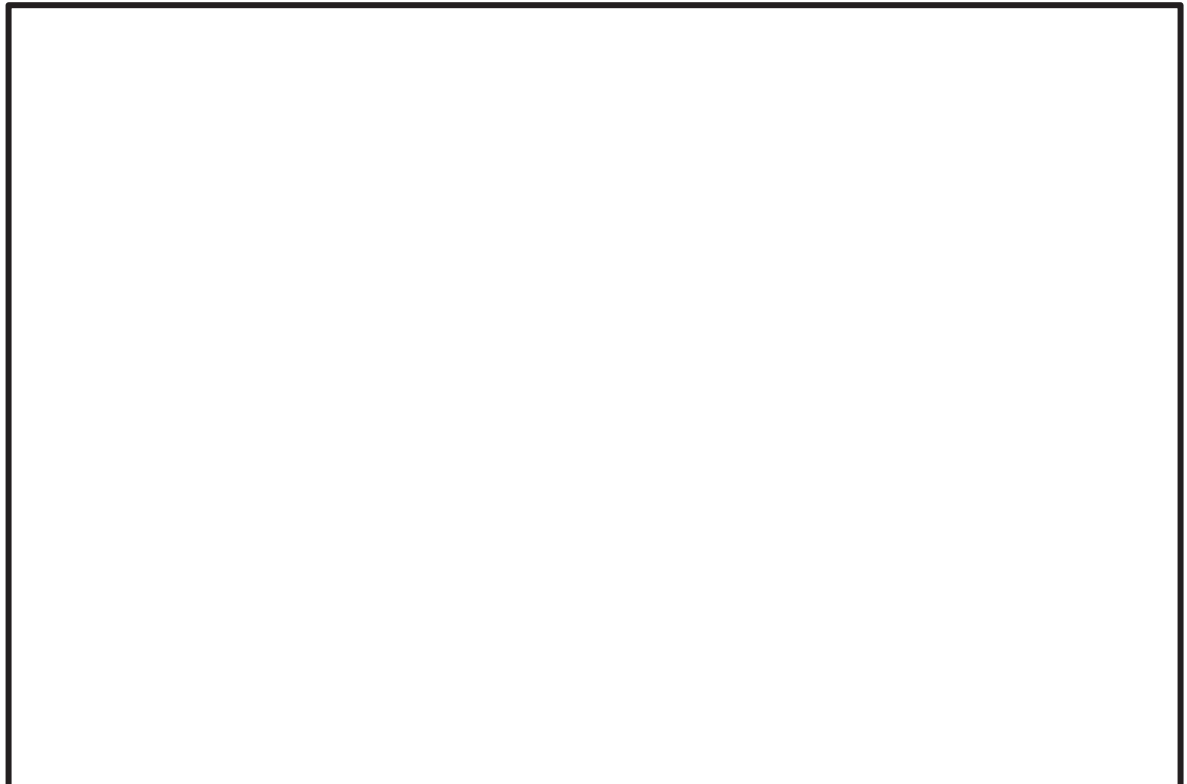


図 1-8 配管鳥瞰図（主蒸気系 MS-002）



図 1-9 配管鳥瞰図（主蒸気系 MS-003）



図 1-10 配管鳥瞰図（主蒸気系 MS-004）



図 1-11 配管鳥瞰図（原子炉再循環系 PLR-001）

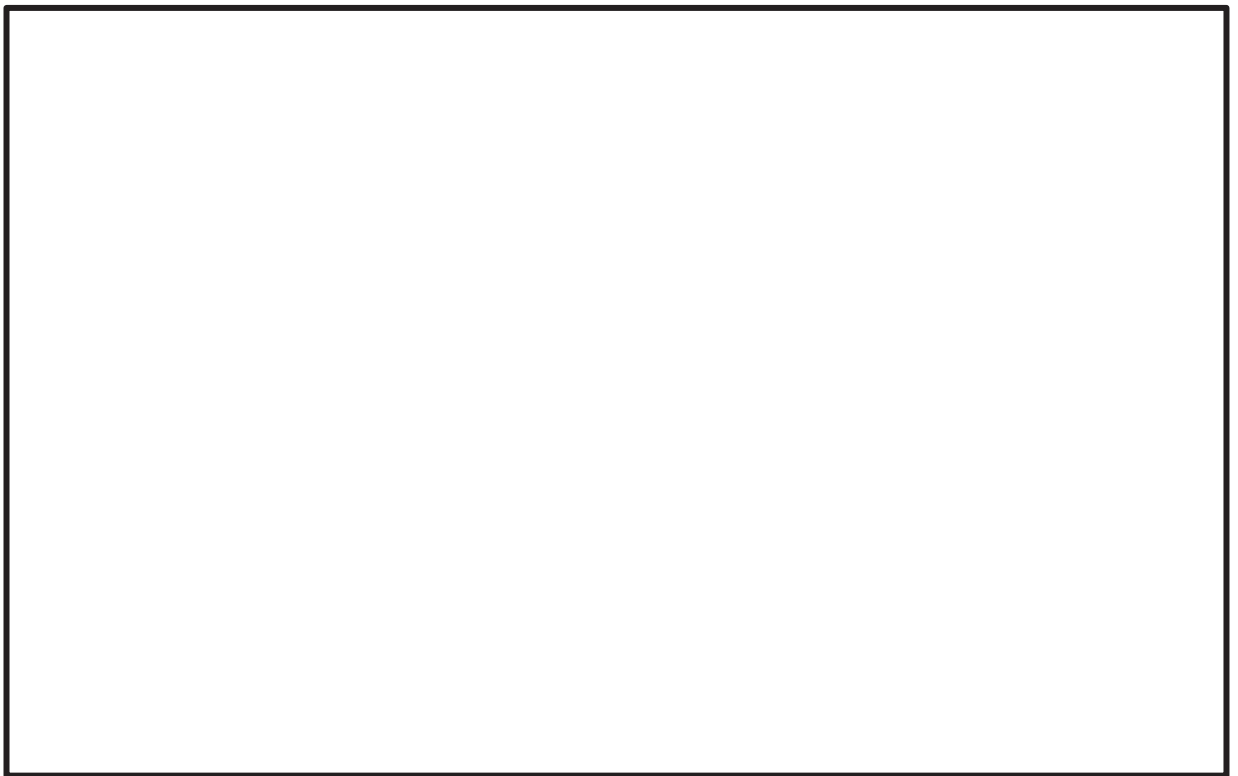


図 1-12 配管鳥瞰図（原子炉再循環系 PLR-002）

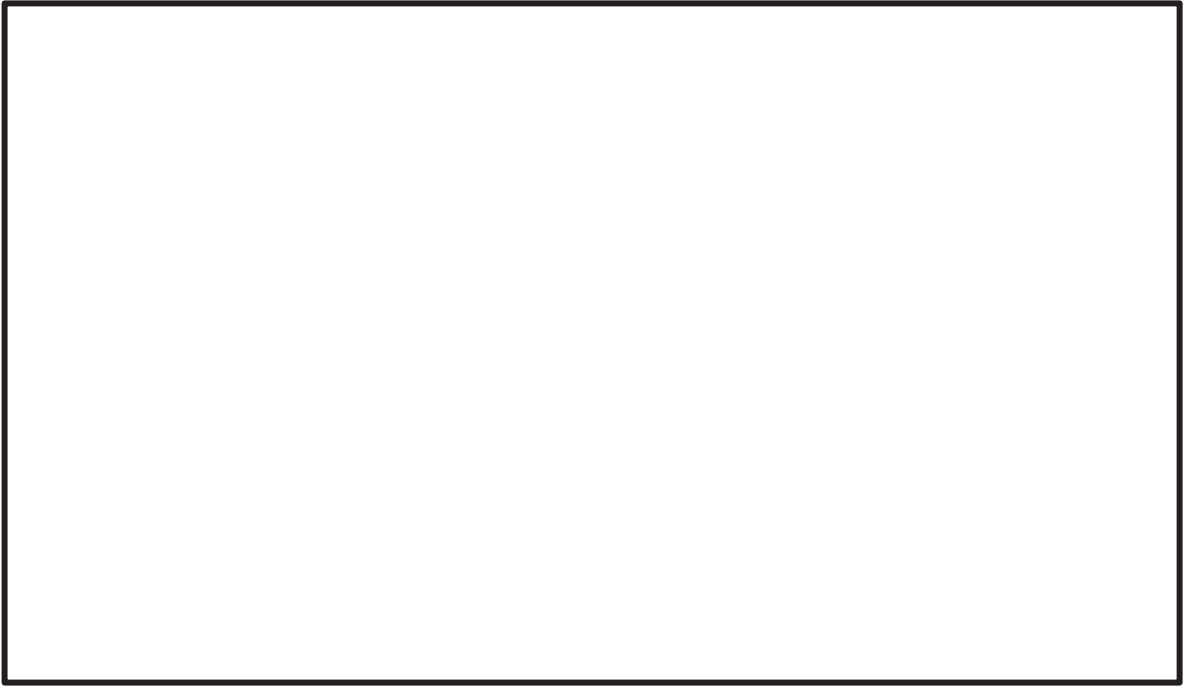


図 1-13 配管鳥瞰図（残留熱除去系 RHR-001）

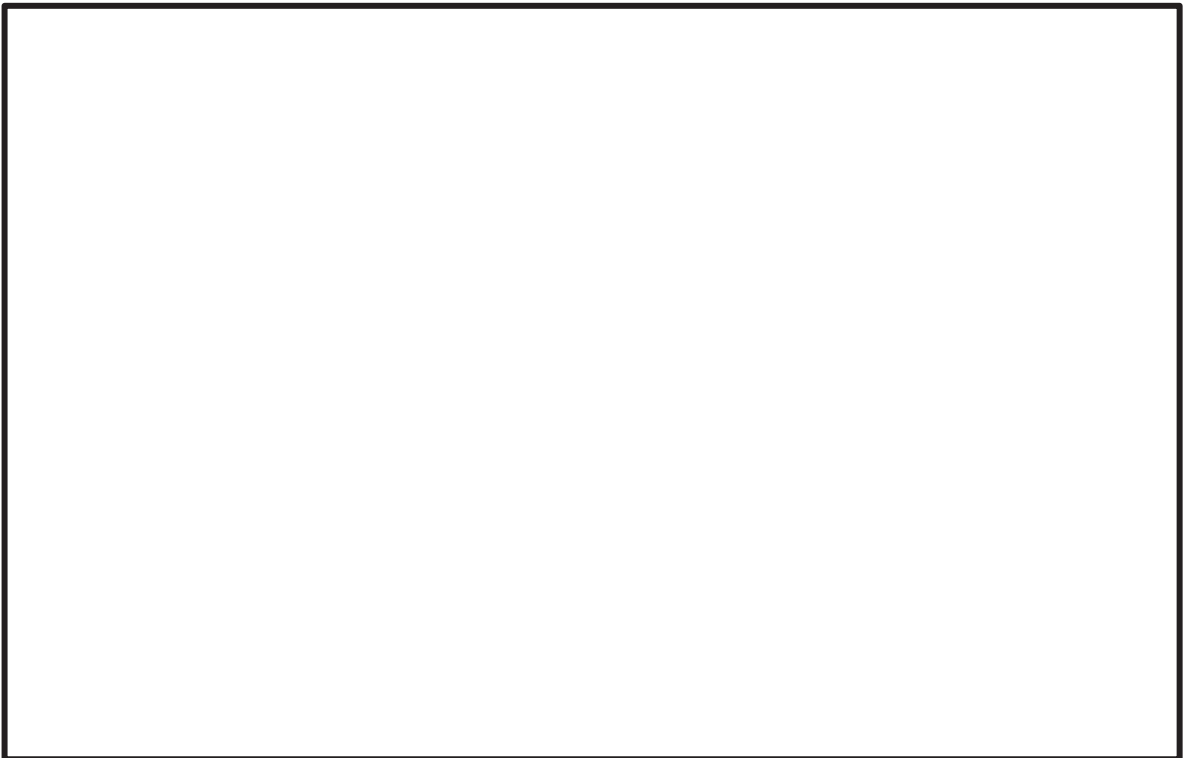


図 1-14 配管鳥瞰図（残留熱除去系 RHR-002）



図 1-15 配管鳥瞰図（残留熱除去系 RHR-003）



図 1-16 配管鳥瞰図（残留熱除去系 RHR-005）

2. ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）の  
ミサイル評価について



## 目 次

1. 概要	2-1
2. 評価対象	2-1
3. 評価方針	2-2
4. 評価内容	2-2
5. 評価結果	2-5
6. ミサイル評価報告書とガスタービン（ガスタービン発電機）の ミサイル評価比較	2-6

## 1. 概要

ガスタービン駆動補機については、使用材料の検査、製品の品質管理、規格等に基づき安全設計及び定期検査により損壊防止を図ること、並びに調速装置及び非常調速装置を設けることにより損壊防止対策が十分実施される。

調速装置は、通常運転時の定格回転速度を一定に制御する機能及び事故時等の回転速度上昇を抑制する機能を有しており、事故時等において回転速度が定格回転速度以上に上昇しても、調速装置の機能により非常調速装置が作動する回転速度未満に制御できるように設計する。

非常調速装置は、万一、調速装置が機能することなく異常な過回転が生じた場合においても、「発電用火力設備に関する技術基準を定める省令」及び「発電用火力設備の技術基準の解釈」に適合する定格回転速度の1.11倍を超えない範囲で作動し機器を自動停止させることにより、本設定値以上のオーバースピードとならない設計とし、オーバースピードに起因する機器の損壊を防止する。

また、各機器については非常調速装置が実作動するまでのオーバースピード状態においても構造上十分な機械的強度を有する設計とし、非常調速装置については、各機器をオーバースピード状態にして非常調速装置の作動確認を行うとともに、非常調速装置が実作動するまでのオーバースピード状態の健全性を確認することにより、機器の損壊を防止する。

以上のことにより、タービンミサイルが発生するような事故は極めて起こりにくいと考えられる。しかしながら、ガスタービンについては定格回転速度が  min<sup>-1</sup> と非常に高速であることを踏まえ、仮想的に圧縮機ディスク及びタービンディスクが損壊することを想定し、昭和 52 年 7 月 20 日付け原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」（以下「ミサイル評価報告書」という。）に基づき、損壊した回転体の緊急用電気品建屋外壁貫通有無を評価する。

## 2. 評価対象

ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）

機種	:	IM400
定格回転速度	:	<input type="text"/> min <sup>-1</sup>
過速度トリップ	:	<input type="text"/> min <sup>-1</sup>
圧縮機	:	軸流式14段
タービン	:	軸流式 4 段

### 3. 評価方針

ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）の圧縮機ディスク及びタービンディスク損壊を想定した場合における，緊急用電気品建屋外壁の貫通有無を評価する。

### 4. 評価内容

緊急用電気品建屋外壁の貫通に対する評価については，ミサイル評価報告書及び「ISES 7607-3 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」（高温構造安全技術研究組合）（以下「ISES 7607」という。）に記載のBRL式(Ballistic Research Laboratories Formula)を用いて評価を行う。

また，評価においては，ミサイル評価報告書に基づき，以下の条件を考慮する。

#### (1) 評価条件

- a. ミサイル発生時の回転速度は設計過速度の上限値とする。(   min<sup>-1</sup>)
- b. ディスクは破損する際，等分な四分割のミサイル化を考慮する。
- c. 貫通厚さの算出については，鋼板に対する貫通評価式としてBRL式を使用する。

#### (2) BRL式を用いた評価

緊急用電気品建屋外壁に必要な板厚は，ISES 7607「3. 鋼板に対する評価」のBRL式から求め，影響を評価する。

$$T^{3/2} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{17400 \cdot K^2 \cdot d^{3/2}} \dots \text{BRL 式}$$

ここで，

T = 鋼板貫通厚さ (inch)

M = ミサイル質量 (lb・sec<sup>2</sup>/ft)

V = ミサイル速度 (ft/sec)

d = ミサイル直径 (inch)

K = 鋼板の grade に関する定数 (≒1.0) である。

ISES 7607「3. 鋼板に対する評価」のBRL式については，ヤード・ポンド単位のものであり，SI単位に換算すると，以下のとおりとなる。

$$T' = 2.54 \times 10^{-2} \times T \text{ (m)}$$

$$M' = 14.6 \times M \text{ (kg)}$$

$$V' = 0.3048 \times V \text{ (m/s)}$$

$$d' = 2.54 \times 10^{-2} \times d \text{ (m)}$$

したがって、SI単位ではBRL式は以下のとおりとなる。なお、本式については、添付書類 VI-3「強度に関する説明書」のうちVI-3-別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」での強度計算式と同一である。

$$T',^{3/2} = \frac{0.5 \cdot M' \cdot V'^2}{1.4396 \cdot 10^9 \cdot K^2 \cdot d',^{3/2}}$$

(3) タービンミサイル計算条件及び計算値

タービンミサイルの計算条件及び計算値を以下の表 2-1 に示す。

表 2-1 タービンミサイル計算条件及び計算値

--

注記\*：全 14 段のうち評価条件の厳しいものを記載する。

(4) 圧縮機ディスクの評価対象

貫通厚さの計算結果への影響が大きくなる条件として、圧縮機ディスクの質量及び径が大きくなるディスクを評価条件の厳しいものとして選定している。圧縮機ディスクの構造を図2-1に示す。

- ・ 第 14 段圧縮機ディスク：全 14 段のうち、質量及び径が最大
- ・ 第 1 段圧縮機ディスク：第 14 段に次いで質量が大きい
- ・ 第 13 段圧縮機ディスク：第 14 段に次いで径が大きい



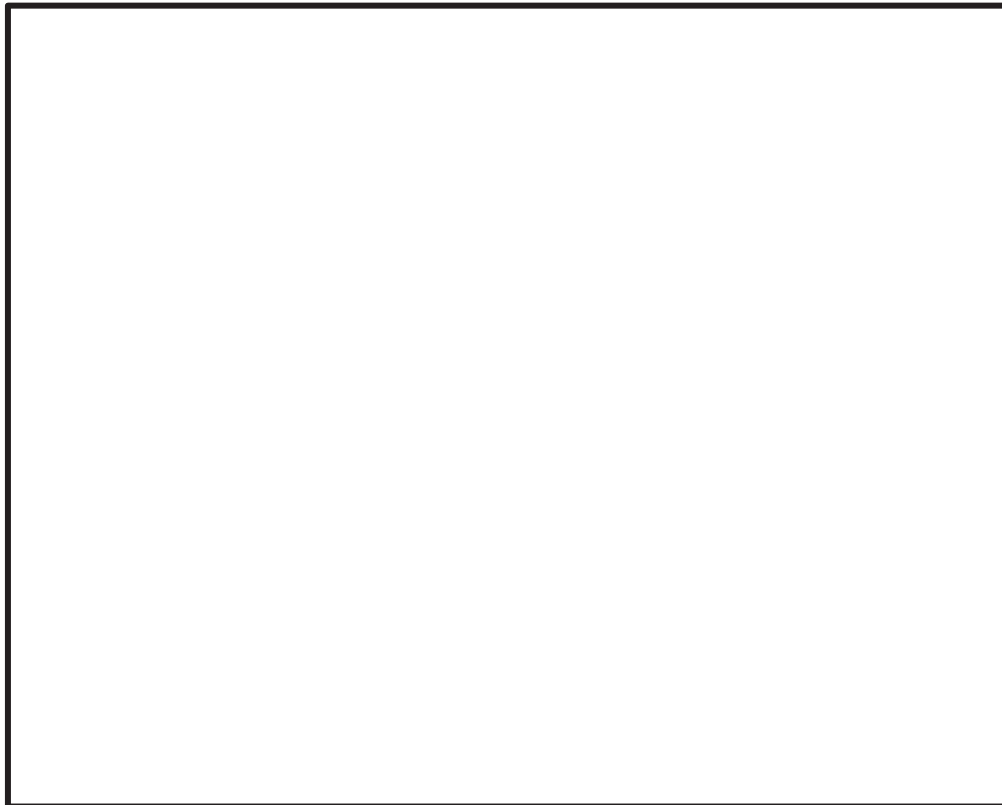
図 2-1 圧縮機ディスク構造図

5. 評価結果

ガスタービン駆動補機に関して，仮想的に圧縮機ディスク及びタービンディスクが損壊することを想定しても，緊急用電気品建屋外壁厚さはタービンミサイルの防護上必要な板厚を上回ることから，損壊した回転体が緊急用電気品建屋外壁を貫通することなく内部に留まるため，タービンミサイルは発生しない。

仮想的損壊時のミサイル評価結果を表2-2 ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価結果に示す。

表 2-2 ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価結果



6. ミサイル評価報告書とガスタービン（ガスタービン発電機）のミサイル評価比較

<p>原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>タービンミサイル評価について  <small>昭和52年7月20日          原子炉安全専門審査会</small></p>	<p style="text-align: center;">_____</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p>本比較表中の <span style="border: 2px dashed red; display: inline-block; width: 1em; height: 1em; vertical-align: middle;"></span> は、ミサイル評価報告書の評価内容をガスタービン（ガスタービン発電機）のミサイル評価における評価対象とする事項を示す。また、その補足説明を下線にて示す。</p> </div>

<p>原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>はじめに</p> <p>本検討会は「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」の指針5.に言う飛来物の内タービンミサイルをどのように評価するかについての判断基準等を決定することを目的とした。</p> <p>本検討会は昭和52年6月の第160回原子炉安全専門審査会で上記目的のために設置された。以降合計4回の会合を持ち、観念検討を行い、本報告書をまとめた。</p> <p>I 評価モデル</p> <p>1. タービンミサイルの想定</p> <p>i) 低圧タービン羽根</p> <p>ii) T-Gカップリング</p> <p>iii) 低圧タービンディスク（一体型ロータを含む）</p> <p>iv) その他（タービンロータ、発電機ロータ等）を考える。</p>	<p>I 評価モデル</p> <p>1. タービンミサイルの想定</p> <p>i) 評価対象外（羽根：小型ガスタービン翼であるため、質量（ミサイル質量：M）が小さく飛散時のエネルギーが小さい）</p> <p>ii) 評価対象外（カップリング：重心位置が中央寄りであるため、評価速度（ミサイル速度：V）が小さい。また、小径で質量（ミサイル重量：M）が小さく飛散時のエネルギーが小さい）</p> <p>iii) 評価対象として、圧縮機ディスク、タービンディスクを考慮する。</p> <p>iv) 評価対象外（PTOシャフト：重心位置が中央寄りであるため、評価速度（ミサイル速度：V）が小さく飛散時のエネルギーが小さい。また、構造上長軸であり、飛散物となる破損形態になることは考え難い。）</p>



<p>原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>2. ミサイル防護の対象とすべき機器等 (11) 以下の観点から対象を選定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>i) 原子炉の安全な停止機能の確保</li> <li>ii) 原子炉格納容器と原子炉冷却材圧力バウンダリ同時破損防止</li> <li>iii) 燃料及び使用済燃料プールの健全性の確保</li> <li>iv) 残留熱除去機能の確保</li> <li>v) 非常用電源の確保</li> </ul> <p>上記のうち、系統の多重性、配置等の関連で具体的に格納容器内冷却材圧力バウンダリ、使用済燃料プールが対象となる。</p> <p>3. 確率評価のモデル</p> <p>タービンミサイルの評価は発生確率 (P<sub>1</sub>)、到達確率 (P<sub>2</sub>)、破損確率 (P<sub>3</sub>) を総合した下記の式により行うこととする。</p> $P = \sum_i (P_{1i} \times P_{2i} \times P_{3i}) \quad (i = B, C, D, R)$ <p>但し B：低圧タービン羽根  C：T-Gカププリング  D：低圧タービンディスク  R：タービンロータ、発電機ロータ</p> <p>(1) 発生確率 (P<sub>1</sub>)</p> <p>I.1で想定されている各項目がミサイル化する確率は、理論的な確率評価にもとづき、その妥当性が確認されたもの、もしくは、実績に基づきその妥当性が確認されたものを使用する。</p> <p>妥当性が確認されないときは、ミサイル発生確率 ( <math>\sum_i P_{1i}</math> ) は <math>1.0^{-4}</math>/年<sup>(1)</sup> とする。</p> <p>低圧タービンディスクのミサイル発生確率は <math>5 \times 10^{-6}</math>/年とする。</p>
<p>ガスタービン駆動補機 (ガスタービン発電機) のミサイル評価 (緊急用電気品建屋外壁貫通評価)</p>	<p>2. ミサイル防護の対象とすべき機器等  評価対象外 (ミサイルとなった場合の評価事項)</p> <p>3. 確率評価のモデル  評価対象外 (ミサイルとなった場合の評価事項)</p> <p>(1) 発生確率  評価対象外 (ミサイルとなった場合の評価事項)</p>

<p>原子力委員会炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>(2) 到達確率 (P<sub>2</sub>)</p> <p>1, 2の対象物に到達する確率は次の条件で算出したものとする。</p> <p>① 低圧タービン羽根</p> <p>i) 低圧タービン最終駆動翼1枚がミサイル化したと考える。</p> <p>ii) 飛散羽根は羽根継ぎ部を含めたものとする。</p> <p>iii) ミサイル発生時の回転速度は設計過速度の上限値とする。</p> <p>iv) 外部ケーシングより飛び出した時の残存エネルギーを2%とする。</p> <p>v) ミサイルの飛び出し角度の確率分布については0～25°（外側）の扇角内に一様とする。</p> <p>② T-Gカップリング</p> <p>i) ロータに焼ばめした部分から脱落飛散してミサイル化したものとして考える。</p> <p>ii) ミサイル発生時の回転速度は設計過速度の上限値とする。</p> <p>iii) 脱落後の飛び出し時の残存エネルギーを4.5%とする。</p> <p>iv) ミサイルの飛び出し角度の確率分布については±25°の扇角内に一様に分布するものとする。</p> <p>③ 低圧タービンディスク</p> <p>i) 低圧タービンディスクのうち1段がミサイル化したと各段の到達確率を平均して求める。</p> <p>ii) ミサイルの飛び出し角度の確率分布については最終段ディスク0～25°（外側）<sup>④</sup>、中間段ディスク±5°<sup>⑤</sup>の扇角内に一様に分布するものとする。</p> <p>iii) ミサイル発生時の回転速度は設計過速度の上限値とする。</p> <p>iv) ディスクは破損する際、等分に四分割し、上方に2片のミサイル化を考慮する。</p>	<p>(2) 到達確率</p> <p>① 低圧タービンの羽根 評価対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）</p> <p>② T-Gカップリング 評価対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）</p> <p>③ タービンディスク i) 評価対象外（ミサイルとなった場合の評価事項） ii) 評価対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）</p> <p>iii) ミサイル発生時の回転速度は設計過速度の上限値とする。 過速度トリップ設定値の<math>\square \text{min}^{-1}</math>とする。 ・原子力蒸気タービンは、蒸気加減弁を高閉しても、蒸気加減弁が開まるまでに蒸気が流れており、また、蒸気加減弁からタービンまでの間においても蒸気が残っており、過速度回転からオーバーシュートを考慮しなければならぬ。 ・一方で、ガスタービンは、燃焼ガスはガスタービン本体内にあるのみであり、燃料遮断した後にはタービンを加速させるほどの燃焼ガスは残っていない。また、圧縮機とタービンが同軸で繋がっており、機能的にはタービンが回転すると、圧縮機がブレーキ役になるため、タービンはオーバーシュートしにくくなっている。</p> <p>iv) ディスクは破損する際、等分に四分割し、上方に2片のミサイル化を考慮する。 ディスクは破損する際、等分な四分割のミサイル化を考慮する。</p>

<p>原子力委員会炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>④ その他 高圧タービンロータ、発電機ロータに関してミサイル化が考えられるものについては低圧タービンディスクに準じた評価を行うものとする。</p> <p>(3) 破損確率 (P<sub>i</sub>) タービンミサイルの衝突により1, 2の対象物が破損する確率は、その妥当性が確認されたものを使用する。妥当性が確認されないときは、破損確率を1とする。</p> <p>II 判定基準 基本的な考え方は、タービンミサイルにより安全上重要な機器（1, 2の機器）が破損する確率が<math>10^{-7}</math>/年以下となることを確認することである。 具体的な判断基準は以下のとおりとする。</p> <p>1. 到達確率（<math>\sum P_{2,i}</math>）のみで評価する場合には1, 2のそれぞれ対象とすべき機器に対し、その確率が<math>10^{-6}</math>以下であれば<math>P_{1,i}</math>が<math>10^{-7}</math>/年としても総合的にみて機器が破損する確率は<math>10^{-7}</math>/年以下となると評価してよい。 <math>10^{-6}</math>をこえる場合には配置の変更、又は防護対策の強化等により<math>10^{-7}</math>以下にできればよい。</p> <p>2. 上記II, 1を満足しない場合にあつては、ミサイル発生確率<math>P_{2,i}</math>について評価して<math>\sum (P_{1,i} \times P_{2,i})</math>が<math>10^{-7}</math>/年以下となればよい。</p> <p>3. 上記II, 2を満足しない場合にあつてはさらに破損確率<math>P_{2,i}</math>を評価して全体として<math>\sum (P_{1,i} \times P_{2,i} \times P_{3,i})</math>の値が<math>10^{-7}</math>/年以下であればよい。</p> <p>付 録</p> <p>1. ミサイル発生時のエネルギー ミサイル発生時のエネルギーとしては、タービンの回転による運動エネルギーのみとし、ミサイル化の際の弾性歪、車室内蒸気エネルギーの効果は考慮しない。</p>	<p>④ その他 ガスタービンの評価として、圧縮機ディスクの損傷を考慮し、上記③（タービンディスク）の皿及び皿に準じた評価を行う。</p> <p>(3) 破損確率 対象外（ミサイルとなつた場合の評価事項）</p> <p>II 判定基準 対象外（ミサイルとなつた場合の評価事項）</p> <p>1. ミサイル発生時のエネルギー 対象外（ミサイルとなつた場合の評価事項）</p>

<p>原子力委員会炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>2. ディスクミサイルのケーシング貫通後の飛び出し速度  ケーシング貫通後の飛び出し速度は <math>V_{min} \sim V_{max}</math> に一律に分布するとする。ここで <math>V_{max}</math> 及び <math>V_{min}</math> は内部固定構造物（ノズル、ダイヤフラム外輪、翼根リング、翼環など）の変形、内部ケーシング及び外部ケーシングの変形によるエネルギー損失及び飛散物の変形によるエネルギー損失を考慮して求めた最大及び最小速度である。なお変形及び貫通に用いる式は理論や実験で裏付けられ、タービンケーシング構造に対し妥当と考えられる式を使用するものとする。  なおケーシング内部では直進及び回転エネルギーを評価するが、ケーシングを飛び出した後はすべて直進エネルギーになるものとする。</p> <p>3. 到達確率（<math>P_{zi}</math>）の評価法  計算方法についてはSRP 3.5.1.3Appendix A<sup>(2)</sup>又は立面の効果を考慮出来る同等の方法<sup>(3)</sup>を使用する。</p> <p>4. 貫通厚さ（T）の算出について  以下に示す式及び係数を使用する。  (1) コンクリートに対しては修正NDRCの式<sup>(4)(5)</sup>を使用する。  形状係数（N）については  タービン羽根 N=1.14  T-Gカップリング N=0.72  ディスク N=0.84  ロータ N=0.84</p>	<p>2. ディスクミサイルのケーシング貫通後の飛び出し速度  対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）  ・本評価は主タービン等大型タービン評価に用いるものであり、実施試験結果等を踏まえ構築データが得られている場合の評価である。小型タービンであるガスタービンの場合、構築データが得られておらず、実験等による検証等が必要である。</p> <p>3. 到達確率（<math>P_{zi}</math>）の評価法  対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）</p> <p>4. 貫通厚さ（T）の算出について  (1) 対象外（(2)の鋼板にて評価を行う）</p>

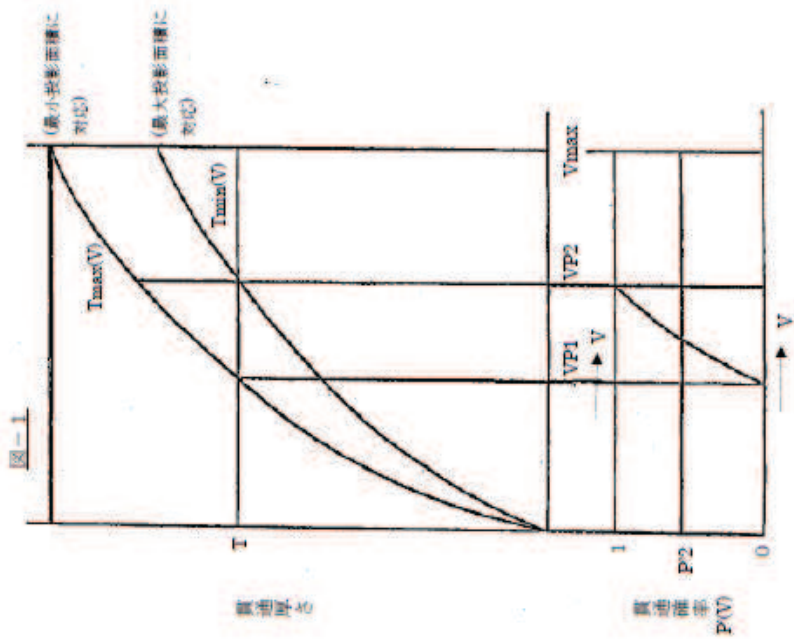
<p>原子力委員会炉安全専門審査会報告書「タービンミサイイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>〔2〕鋼板に対してはBRL(016)の式を使用する。</p> $P^*(V) = \frac{\int_{V_{min}}^{V_{max}} P'(v) dV}{\int_{V_{min}}^{V_{max}} dV} \quad (A-1)$ <p>ここではP'(V)は図-1に示すように  <math>V &lt; V_{P1}</math> の場合 <math>P'(V) = 0</math>  <math>V_{P1} \leq V \leq V_{P2}</math> の場合  <math>P'(V) = \frac{T_{max}(V) - T}{T_{max}(V) - T_{min}(V)}</math>  <math>V_{P2} &lt; V</math> の場合 <math>P'(V) = 1</math>      である。      ただし、<math>T_{max}(V)</math>：ミサイイルの最大投影面積に対応する貫通最大厚さ  <math>T_{min}(V)</math>：ミサイイルの最大投影面積に対応する貫通最小厚さ  <math>T</math>：有効壁厚</p>	<p>〔2〕鋼板に対してはBRLの式を使用する。      貫通評価として、BRL式を用いる。詳細は、以下に基づく。      ISES 7607-3 高温構造安全技術研究組合 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査その3 ミサイイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討</p> <p>BRL式 (Ballistic Research Laboratories Formula)</p> $T^{3/2} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{17400 \cdot K \cdot d^{3/2}}$ <p>ここで、  <math>T</math> = 鋼板貫通厚さ (inch)  <math>M</math> = ミサイイル質量 (lb・sec<sup>2</sup>/ft)  <math>V</math> = ミサイイル速度 (ft/sec)  <math>d</math> = ミサイイル直径 (inch)  <math>K</math> = 鋼板の grade に関する定数 (≒1.0) である。</p> <p>5. 遮蔽効果のとり方      対象外（ミサイイルとなった場合の評価事項）</p>

原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」

ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）

6. 入射角の効果について  
対象外（ミサイルとなった場合の評価事項）

B. 入射角の効果について  
ミサイル貫通厚さの計算に、壁に対するミサイルの入射角の効果も考慮してもよい。ただし、壁面に対するミサイル入射角を $\theta$ とすればその効果は $\cos^2 \theta$ とする。



<p>原子力委員会原子炉安全専門審査会報告書「タービンミサイル評価について」</p>	<p>ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）のミサイル評価（緊急用電気品建屋外壁貫通評価）</p>
<p>参 考 文 献</p> <p>(1) R.G.I. 115 Rev 1. Working Paper "B" 27 Jan 1977 "Protection Low Trajectory Turbine Missiles"</p> <p>(2) Standard Review Plan SEC 3.5.1.3 "Turbine Missiles" Against</p> <p>(3) Nuclear Safety Vol 14 No. 3 May-June 1973 "Probability of Damage to Nuclear Components Due to Turbine Failure" by Spencer H. Bush</p> <p>(4) ISES 7607-3 高温構造安全技術研究組合 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その 8 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討</p>	<p>(4) ISES 7607-3 高温構造安全技術研究組合 軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その 8 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討</p> <p>BRL 式の引用として、本文献を参照する。</p>

3. ディーゼル駆動補機及びタービン駆動補機の評価対象  
並びに過速度トリップ設定値について



## 目 次

1. ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及び ガスタービン駆動補機の評価対象について .....	3-1
2. ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及び ガスタービン駆動補機の過速度トリップ設定値について .....	3-2

1. ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の評価対象について

ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の高速度回転機器の損傷に関しては，高速度回転機器が過速度に起因する損傷に伴う飛散物とならないことを説明するものであるが，設計基準対象施設に関しては技術基準規則の要求事項に変更がない。

このことから，今回の評価対象機器としては，ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機のうち，新たな設計基準対象施設及び重大事故等対処設備とする。

表3-1にディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の評価対象を示す。

表3-1 ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の評価対象

機器（回転機器）		ディーゼル 駆動	蒸気タービン 駆動	ガスタービン 駆動	評価 対象
設計基準 対象施設	屋外消火系ディーゼル駆動消火ポンプ	○*			○
	原子炉隔離時冷却系ポンプ		○		
	蒸気タービン		○		
	タービン駆動原子炉給水ポンプ		○		
	非常用ディーゼル発電機	○			
	高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機	○			
	発電機		○		
重大事故等 対処設備	大容量送水ポンプ（タイプⅠ）	○			○
	大容量送水ポンプ（タイプⅡ）	○			○
	高圧代替注水系タービンポンプ		○		○
	原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット（ポンプ）	○*			○
	ガスタービン発電機			○	○
	電源車（発電機）	○			○
	電源車（緊急時対策所用）（発電機）	○			○
	可搬型窒素ガス供給装置発電設備（発電機）	○			○

注記＊：これらのポンプについては，非常調速装置がないため，異常な過回転に伴う異常振動等が確認された場合，手動での非常停止が可能な設計とする。

2. ディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の過速度トリップ設定値について

高速回転機器のうち，非常调速装置を設けている新たな設計基準対象施設及び重大事故等対処設備であるディーゼル駆動補機，蒸気タービン駆動補機及びガスタービン駆動補機の過速度トリップの設定値をそれぞれ表3-2，表3-3及び表3-4に示す。

表 3-2 ディーゼル駆動補機の過速度トリップ設定値

機器（回転機器）	回転速度			
	定格回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	過速度トリップ 回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	<参考> 発火基準* <sup>1</sup> (非常调速装置)	<参考> NEGA* <sup>2</sup> (保護装置)
大容量送水ポンプ（タイプⅠ）	2300	2645 (約 115%)	1.16 倍を 超える以前	116%以下
大容量送水ポンプ（タイプⅡ）	2300	2645 (約 115%)		
電源車（発電機）	1500	1690 (約 113%)		
電源車（緊急時対策所用）（発電機）	1500	1690 (約 113%)		
可搬型窒素ガス供給装置発電設備（発電機）	1500[50Hz] (1800[60Hz])	2070* <sup>3</sup> (約 115%)		

注記\*1：発電用火力設備に関する技術基準を定める省令及び発電用火力設備の技術基準の解釈に基づく過速防止装置の作動範囲

\*2：可搬形発電設備技術基準（NEGA C 331:2005）に基づく過回転防止装置の動作値

\*3：定格回転速度は  $1500\text{min}^{-1}$ [50Hz]または  $1800\text{min}^{-1}$ [60Hz]に切替えできる設計であり，過速度トリップ回転速度は定格回転速度  $1800\text{min}^{-1}$ に対する動作値

表 3-3 蒸気タービン駆動補機の過速度トリップ設定値

機器（回転機器）	回転速度	
	定格回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )	過速度トリップ回転速度 ( $\text{min}^{-1}$ )
高圧代替注水系タービンポンプ	7829（締切運転時）	9003（約 115%）

表3-4 ガスタービン駆動補機の過速度トリップ設定値

機器（回転機器）	回転速度		
	定格 回転速度 (min <sup>-1</sup> )	過速度 トリップ 回転速度 (min <sup>-1</sup> )	<参考> 発火基準* (非常调速装置)
ガスタービン発電機			1.16 倍を 超える以前

注記\*：発電用火力設備に関する技術基準を定める省令及び発電用火力設備の技術基準の解釈に基づく過速防止装置の作動範囲