

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-工-B-01-0022_改0
提出年月日	2021年5月25日

VI-1-1-9 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説明書

2021年5月
東北電力株式会社

目次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 評価	2
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	2
3.1.1 評価方針	2
3.1.2 評価内容	3
3.1.3 評価結果	4
3.2 高速回転機器の損壊による飛散物	4
3.2.1 評価方針	4
3.2.2 評価内容	5
3.2.3 評価結果	7

1. 概要

本資料は、「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」（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、機器の損壊又は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とともに、技術基準規則第 54 条第 1 項第 5 号及びその解釈に基づき、悪影響防止として高速回転機器が飛散物とならないことについて説明するものである。

配管の破損に関しては、設計基準対象施設に属する設備のうち原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲となる弁 E11-F019A, B（残留熱除去系 A 系停止時冷却試験可能逆止弁，残留熱除去系 B 系停止時冷却試験可能逆止弁）から弁 E11-F018A, B（残留熱除去系 A 系停止時冷却注入隔離弁，残留熱除去系 B 系停止時冷却注入隔離弁）まで、弁 E11-F015A, B（残留熱除去系 A 系停止時冷却吸込第一隔離弁，残留熱除去系 B 系停止時冷却吸込第一隔離弁）から弁 E11-F016A, B（残留熱除去系 A 系停止時冷却吸込第二隔離弁，残留熱除去系 B 系停止時冷却吸込第二隔離弁）まで及び弁 E11-F022（残留熱除去系ヘッドスプレイ注入逆止弁）から弁 E11-F021（残留熱除去系ヘッドスプレイ注入隔離弁）までの主配管（以下「RCPB 拡大範囲」という。）が今回の申請範囲となることから、RCPB 拡大範囲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を行うことについて説明する。

また、機器の損壊に関しては、高速回転機器のうち新たな設計基準対象施設、改造を伴う設計基準対象施設及び重大事故等対処設備が今回の申請範囲となることにより、これらの高速回転機器がオーバースピードに起因する損壊に伴う飛散物とならないことを説明する。

なお、重大事故等対処設備のうち、原子炉隔離時冷却系ポンプ、高圧炉心スプレイ系ポンプ、非常用ディーゼル発電機等については、設計基準事故時と使用する系統設備及び使用方法に変更がないこと並びに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ため、今回の申請において変更は行わない。

2. 基本方針

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、「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。）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。

また、新たな設計基準対象施設、改造を伴う設計基準対象施設及び重大事故等対処設備については、高速回転機器が損壊し、飛散物とならないように保護装置を設けること等により、オーバースピードとならない設計とするとともに、ガスタービン駆動補機については、定格回転速度が非常に高速であることを踏まえ、仮想的にタービンが損壊することも想定し影響を評価する。

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配管の破損又は機器の損壊には、以下の要因が考えられる。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、また、高速回転機器については損壊に伴う飛散物とならないことを評価する。

(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

- ・RCPB 拡大範囲

(2) 高速回転機器の損壊

- ・高圧代替注水系タービンポンプ、ガスタービン発電機、電動機駆動消火ポンプ（第1, 2号機共用）等、今回の申請範囲となる高速回転機器である新たな設計基準対象施設、改造を伴う設計基準対象施設及び重大事故等対処設備を表1「主要回転機器一覧」に示す。

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

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RCPB拡大範囲について、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年追補版含む。)) <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。

3.1.2 評価内容

評価においては、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

RCPB 拡大範囲について、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

$$(a) \quad S_n > 2.4 S_m, \text{ かつ, } S_e > 2.4 S_m$$

$$(b) \quad S_n > 2.4 S_m, \text{ かつ, } S_n' > 2.4 S_m$$

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) の計算式に準じて計算した熱膨張応力。

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 (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 S_d -D1, S_d -D2, S_d -D3, S_d -F1, S_d -F2, S_d -F3 及び S_d -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 ≤ 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、必要に応じて以下の対策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、十分な離隔距離をとる。
- 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レストレイント等を設ける。

3.1.3 評価結果

RCPB拡大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はなく、配管破損想定位置は弁E11-F022(残留熱除去系ヘッドスプレイ注入逆止弁)から弁E11-F021(残留熱除去系ヘッドスプレイ注入隔離弁)までの配管におけるターミナル・エンドの1箇所であることを確認した。また、当該配管破損想定位置と防護対象機器は、十分な離隔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。

3.2 高速回転機器の損壊による飛散物

3.2.1 評価方針

ポンプ、ファン等の回転機器は、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については、調速装置及び非常調速装置等を設けることにより損壊防止対策が十分実施される。具体的な回転機器のオーバースピードに起因する損壊防止対策については、「3.2.2 評価内

容」により評価し、必要に応じ設計上考慮する。

3.2.2 評価内容

高速回転機器については、機器毎に駆動源が異なるため、それぞれオーバースピードに対する損壊防止について必要に応じ設計上考慮する。

(1) 電動補機

誘導電動機を駆動源とする機器は、供給側の電源周波数が一定であることより、負荷（インペラ側の水等）が喪失しても、電流が変動するのみで回転速度は一定を維持し、オーバースピードとならないため、設計上考慮する必要はない。

また、各機器については運転状態を考慮し、構造上十分な機械的強度を有する設計とし、通常運転時及び定期検査時等においても健全性を確認することにより、機器の損壊を防止する。

(2) ディーゼル駆動補機

ディーゼル機関を駆動源とする機器には、各々調速装置及び保護装置として非常調速装置等を設けオーバースピードに起因する機器の損壊を防止する設計とする。

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負荷変動時等の回転速度上昇を抑制する機能を有しており、負荷変動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」並びに「可搬形発電設備技術基準（NEGA C 3 3 1 :2005）」に適合する定格回転速度の1.16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。

非常調速装置がない機器については、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、作動確認を行い、装置の健全性を確認することにより、機器の損壊を防止する。

(3) 蒸気タービン駆動補機

蒸気タービンを駆動源とする高圧代替注水系タービンポンプは、調速装置及

び保護装置として非常調速装置を設け、オーバースピードに起因する機器の損傷を防止する設計とする。

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負荷変動時等の回転速度上昇を抑制する機能を有しており、負荷変動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、異常な過回転が生じた場合においても、設定値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、オーバースピードにならない設計とし、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、高圧代替注水系タービンポンプの駆動用タービンは、単段式のタービンであり、タービン翼は一体型のものを適用することで、タービンが破損により飛散することがない設計とする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においても構造上十分な機械的強度を有する設計とする。

さらに、非常調速装置については、作動確認を行い、装置の健全性を確認することにより、機器の損壊を防止する。

(4) ガスタービン駆動補機

ガスタービンを駆動源とするガスタービン発電機は、調速装置及び保護装置として非常調速装置を設け、オーバースピードに起因する機器の損傷を防止する設計とする。

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負荷変動時の回転速度上昇を抑制する機能を有しており、負荷変動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、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、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。

非常調速装置を設ける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、ガスタービン駆動補機については、定格回転速度が min^{-1} 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」に基づき影響を評価する。

3.2.3 評価結果

高速回転機器のオーバースピードに起因する損壊に関して「3.2.2 評価内容」により評価した結果、電動補機については、オーバースピードとならないため、設計上考慮する必要はない。

また、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については、调速装置及び保護装置として非常调速装置を設けること、並びに非常调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すること並びに非常调速装置がない機器については、手動での非常停止が可能な設計とすることにより、オーバースピードに起因する機器の損壊を防止している。非常调速装置については、各機器共に非常调速装置の作動確認を行い、装置の健全性を確認するため、機器が損壊することはなく、損壊による飛散物は発生しない。

なお、ガスタービン駆動補機（ガスタービン発電機）については、仮想的に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「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 1 主要回転機器一覧

機器（回転機器）		電動 駆動	ディーゼル 駆動	蒸気タービン 駆動	ガスタービン 駆動
設計 基準 対象 施設	低圧炉心スプレイ系ポンプ*	○			
	燃料移送ポンプ（非常用ディーゼル発電設備）	○			
	燃料移送ポンプ（高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電設備）	○			
	電動機駆動消火ポンプ（第 1, 2 号機共用）	○			
	屋外消火系電動機駆動消火ポンプ	○			
	屋外消火系ディーゼル駆動消火ポンプ		○		
重大 事故 等 対 処 設 備	燃料プール冷却浄化系ポンプ（設計基準対象施設としてのみ第 1, 2 号機共用）	○			
	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			○	
	直流駆動低圧注水系ポンプ	○			
	復水移送ポンプ	○			
	代替循環冷却ポンプ	○			
	ほう酸水注入系ポンプ	○			
	原子炉補機代替冷却水系熱交換器ユニット（ポンプ）		○		
	中央制御室送風機	○			
	中央制御室再循環送風機	○			
	中央制御室排風機	○			
	緊急時対策所非常用送風機	○			
	非常用ガス処理系排風機	○			
	可搬型窒素ガス供給装置	○			
	ガスタービン発電設備燃料移送ポンプ	○			
	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*：改造を伴う機器を示す。

表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

想定飛散物	鋼板貫通厚さ (mm)	緊急用電気品建屋 外壁厚さ (mm)
[] *	[]	[]

注記*：ミサイル評価のうち、最も評価結果が厳しい対象を記載