

女川原子力発電所 2 号炉

重大事故等対策の有効性評価 成立性確認

補足説明資料

(原子炉格納容器限界温度・限界圧力)

平成27年3月3日

東北電力株式会社

目 次

1. 有効性評価に係る各設備の概要
2. 可搬型設備保管場所及び常設設備設置場所
3. アクセスルート図及び可搬型設備配置図
4. 屋内操作機器配置図及び屋内操作機器へのアクセスルート
5. 重大事故等対策の有効性評価における作業毎の成立性確認結果について
6. 重大事故等対策時の要員の確保及び所要時間について
7. 原子炉水位及びインターロックの概要
8. TBDシーケンスにおける炉心冷却評価について
9. 他号炉との同時被災時における成立性について
10. ベント実施までの代替格納容器スプレイの運用について
11. 原子炉の減圧操作について
12. 原子炉隔離時冷却系の水源切替について
13. 運転手順書における重大事故等への対応について
14. 有効性評価における LOCA 時の破断位置及び口径設定の考え方について
15. 原子炉停止機能喪失時の運転操作について
16. 原子炉停止機能喪失時の運転点について
17. 炉心損傷開始の確認について

- 1 8. 重大事故時における原子炉格納容器圧力逃がし装置ベントライン隔離弁等手動操作時の被ばく線量
- 1 9. 原子炉格納容器限界温度・限界圧力に関する評価結果
- 2 0. 原子炉隔離時冷却系による注水時の原子炉圧力挙動について
- 2 1. スペーサ位置を含めた燃料被覆管温度について
- 2 2. 原子炉水位がレベル1付近まで低下した状態での燃料の健全性について
- 2 3. 給水温度条件の根拠について
- 2 4. 重要事故シーケンス等の選定
- 2 5. ドライウェル水位の上昇による計装設備等への影響について
- 2 6. LPRM 較正用導管等破損時の影響について
- 2 7. 重大事故時におけるベント実施時の待避時間について

下線部：本日提示資料

19. 原子炉格納容器限界温度・限界圧力に関する評価結果

目次（補足 19-）

1	概要	1
1.1	はじめに	1
1.2	限界温度，限界圧力の設定	1
1.3	機能維持の確認	1
(1)	評価対象	1
(2)	機能喪失要因	5
(3)	評価方法	7
(4)	評価結果の概要	12
1.4	結論	30
2	評価	36
2.1	原子炉格納容器本体	36
(1)	評価部位	36
(2)	評価方針	37
(3)	評価	38
(4)	評価結果	41
2.2	ドライウェル主フランジ	64
(1)	評価部位	64
(2)	評価方針	65
(3)	評価	65
(4)	評価結果	72
2.3	機器搬出入用ハッチ	84
(1)	評価部位	84
(2)	評価方針	85
(3)	評価	86
(4)	評価結果	89
2.4	所員用エアロック	100

(1) 評価部位	100
(2) 評価方針	101
(3) 評価	102
(4) 評価結果	108
2.5 逃がし安全弁搬出入口	114
(1) 評価部位	114
(2) 評価方針	115
(3) 評価	115
(4) 評価結果	118
2.6 配管貫通部	128
2.6.1 貫通配管	130
(1) 評価部位	130
(2) 評価方針	130
(3) 評価	131
(4) 評価結果	140
2.6.2 スリーブ	145
(1) 評価部位	145
(2) 評価方針	146
(3) 評価	146
(4) 評価結果	148
2.6.3 端板	158
(1) 評価部位	158
(2) 評価方針	159
(3) 評価	159
(4) 評価結果	160
2.6.4 フランジ部	163
(1) 評価部位	163

(2) 評価方針	164
(3) 評価	165
(4) 評価結果	169
2.6.5 閉止板	171
(1) 評価部位	171
(2) 評価方針	172
(3) 評価	172
(4) 評価結果	173
2.6.6 伸縮継手	178
(1) 評価部位	178
(2) 評価方針	179
(3) 評価	179
(4) 評価結果	181
2.6.7 短管	183
(1) 評価部位	183
(2) 評価方針	184
(3) 評価	184
(4) 評価結果	185
2.7 電気配線貫通部	187
(1) 評価部位	187
(2) 評価方針	188
(3) 評価	190
(4) 評価結果	199
2.8 原子炉格納容器隔離弁	200
2.8.1 原子炉格納容器調気系バタフライ弁	201
(1) 評価部位	201
(2) 評価方針	201

(3) 評価	202
(4) 評価結果	203
2.8.2 移動式炉心内計装系電磁弁	204
(1) 評価部位	204
(2) 評価方針	204
(3) 評価	205
(4) 評価結果	206
2.8.3 移動式炉心内計装系ボール弁	207
(1) 評価部位	207
(2) 評価方針	207
(3) 評価	208
(4) 評価結果	209

1 概要

1.1 はじめに

女川原子力発電所 2 号炉の重大事故等対策の有効性評価において、原子炉格納容器の限界温度、限界圧力をそれぞれ 200℃、2Pd (854kPa[gage], Pd : 最高使用圧力 427kPa[gage]) としている。以下にその根拠と妥当性を示す。

1.2 限界温度、限界圧力の設定

原子炉格納容器の過温・過圧に対する耐性については、既往の電力会社等による共同研究や(財)原子力発電技術機構等での試験又は解析結果より、最高使用温度・最高使用圧力を超えても、直ちに原子炉格納容器の機能である放射性物質の閉じ込め機能を喪失することはなく、顕著に機能劣化する温度・圧力(破損限界)に対して余裕を有しているとの知見が得られている。(女川原子力発電所 2 号炉 原子炉格納容器最高使用温度:171℃(ドライウエル),104℃(サブプレッションチェンバ),最高使用圧力:427kPa[gage])

また、福島第一原子力発電所事故を踏まえ、重大事故等対策の有効性評価における事故シナリオや設備対策を考慮し、試験及び解析評価等を実施している。

これらを踏まえ、有効性評価における原子炉格納容器の限界温度・限界圧力については、破損限界に対し余裕を持った値として、200℃、2Pd と設定している。

1.3 機能維持の確認

(1) 評価対象

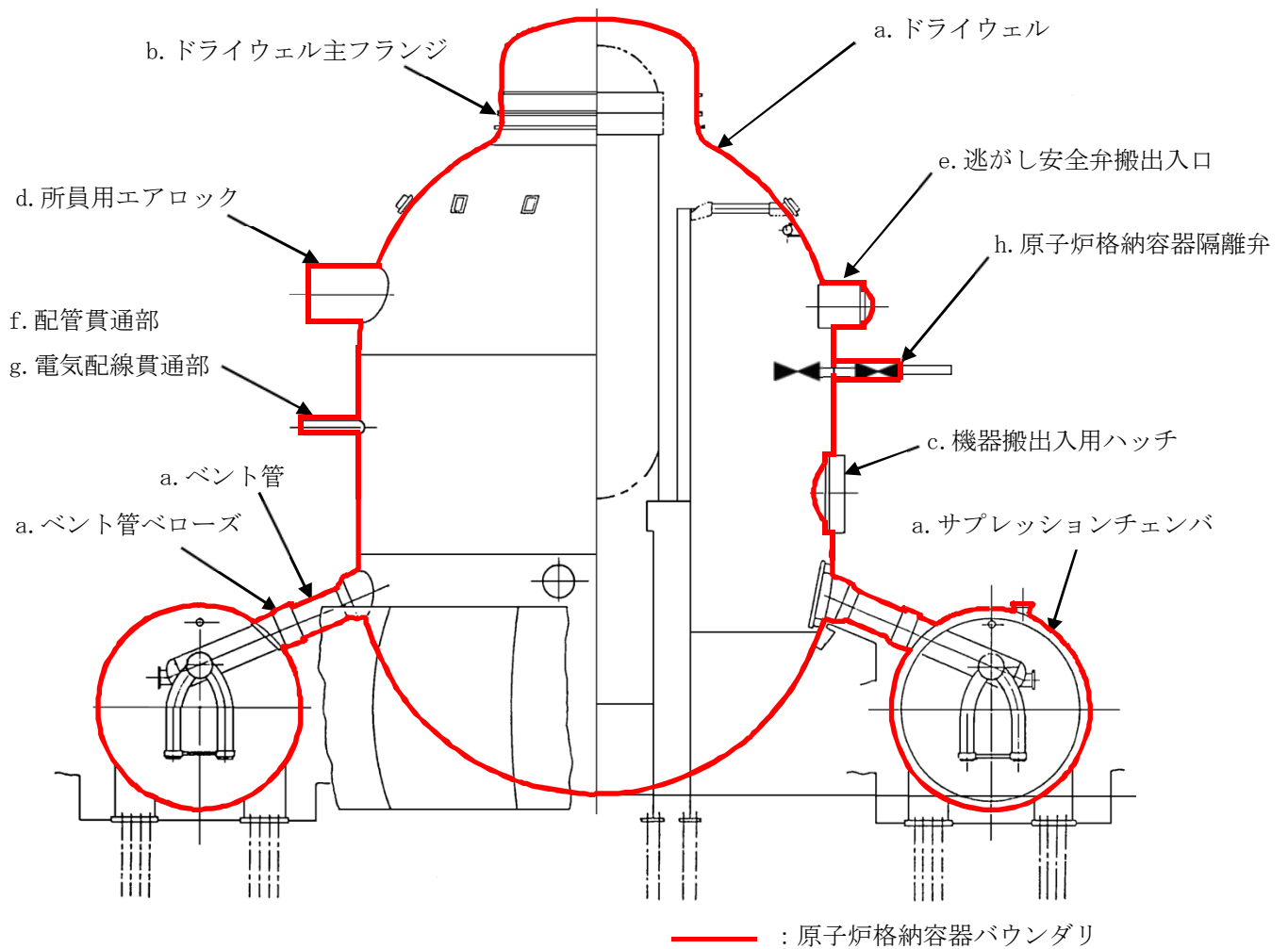
放射性物質の閉じ込め機能を確保するためには、200℃、2Pd の環境下で原子炉格納容器本体及び開口部等の構造健全性を確認する必要がある。

また、福島第一原子力発電所事故において原子炉格納容器からの漏えいの要因の一つとして指摘されている原子炉格納容器に設置されるフランジ部等のシール部についても、200℃、2Pd の環境下での機能維持を確認する必要がある。

このことから、原子炉格納容器本体に加えて、200℃、2Pd の環境下で構造上

漏えいの可能性がある開口部及び貫通部の構成品，並びにガスケットの劣化及びシート部の変形に伴い漏えいの可能性があるシール部を評価対象とする。

原子炉格納容器の評価対象を第 1.3-1 図に示す。



- a. 原子炉格納容器本体
(ドライウェル, サプレッションチェンバ, ベント管 (ベント管ベローズ含む))
- b. ドライウェル主フランジ
- c. 機器搬出入用ハッチ
- d. 所員用エアロック
- e. 逃がし安全弁搬出入口
- f. 配管貫通部
- g. 電気配線貫通部
- h. 原子炉格納容器隔離弁

第 1.3-1 図 原子炉格納容器の評価対象

なお、原子炉格納容器に設置しているハッチ類（機器搬出入用ハッチ，所員用エアロック，逃がし安全弁搬出入口等）は，原子炉格納容器の外側に開く外開き形式，原子炉格納容器内外に扉のあるエアロック形式，原子炉格納容器の内側に開く内開き形式の 3 形式あるが，外開き形式については逃がし安全弁搬出入口のみ，エアロック形式については所員用エアロックのみであるため，これらについて評価を行う。また，内開き形式については，機器搬出入用ハッチ及び制御棒駆動機構搬出入口があるが，円筒胴の板厚は同じであり，内径は機器搬出入用ハッチの方が大きいこと，鏡板の板厚は同じであり，内半径は機器搬出入用ハッチの方が大きいことから，原子炉格納容器内部の圧力増加の影響をより大きく受ける機器搬出入用ハッチについて評価を行う。

原子炉格納容器貫通部（配管貫通部，電気配線貫通部）については，貫通部の構成部品毎に評価を行う。

(2) 機能喪失要因

原子炉格納容器バウンダリの構成部について、重大事故時における放射性物質の閉じ込め機能を喪失させる要因（以下、「機能喪失要因」という。）として、原子炉格納容器内の温度、圧力条件や原子炉格納容器本体の変形に伴う以下の要因が想定される。

評価対象における機能喪失要因を第 1.3-1 表に示す。

第 1.3-1 表 評価対象における機能喪失要因

評価対象		機能喪失要因	
		構造部	シール部
a. 原子炉格納容器本体	胴部等及びドライウェル基部	延性破壊	—
	ベント管ベローズ	疲労破壊	—
b. ドライウェル主フランジ	フランジ	延性破壊	開口, シール能力低下
	締付ボルト	延性破壊	—
c. 機器搬出入用ハッチ	円筒胴取付部	延性破壊	—
	円筒胴	延性破壊	変形, シール能力低下
	鏡板	座屈	—
d. 所員用エアロック	扉及び隔壁	延性破壊	変形, シール能力低下
	円筒胴	延性破壊	—
	シール部（扉以外）	—	シール能力低下
e. 逃がし安全弁搬出入口	円筒胴	延性破壊	—
	鏡板	延性破壊	—
	フランジ	延性破壊	開口, シール能力低下
	ヒンジボルト	延性破壊	—

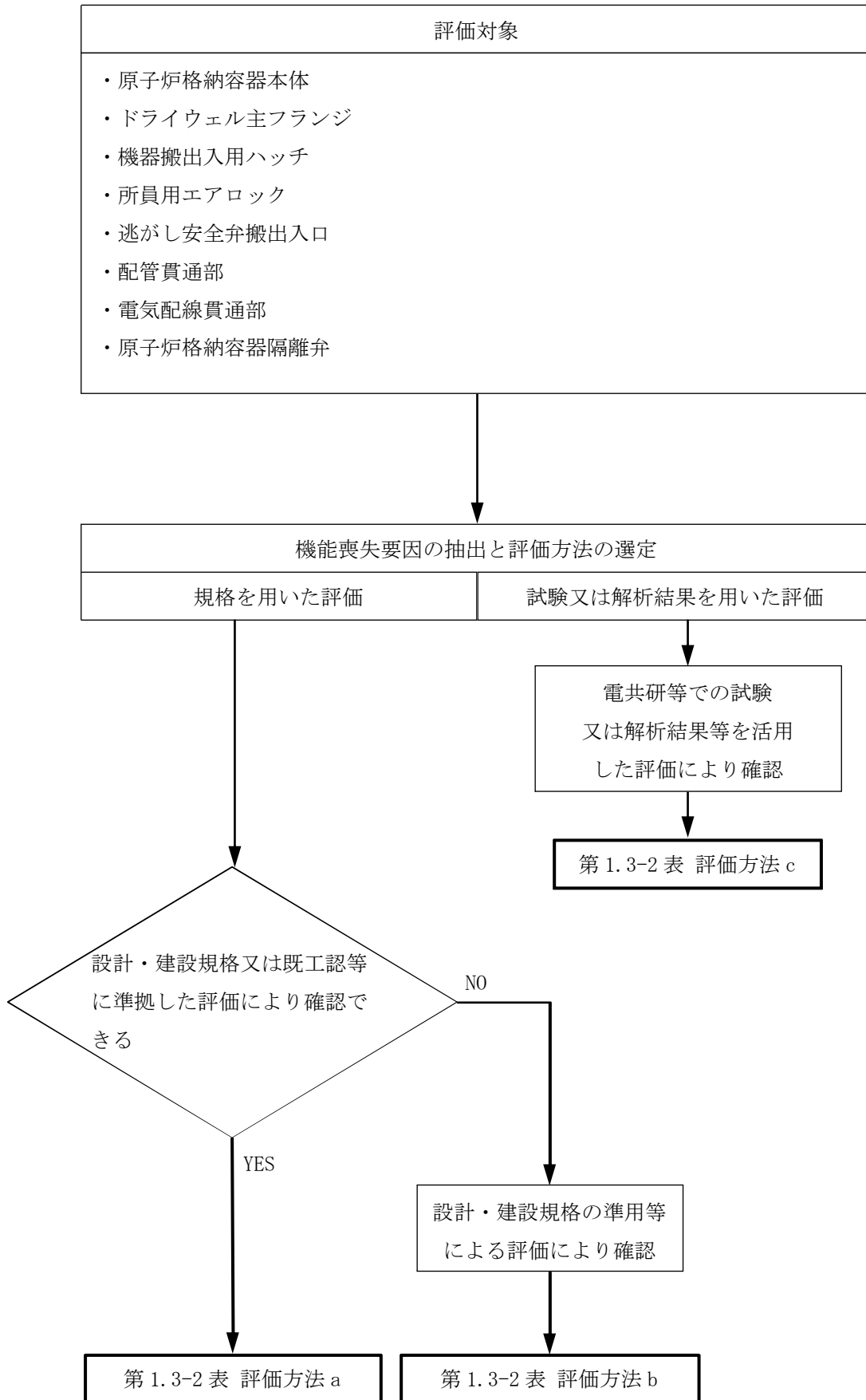
評価対象		機能喪失要因	
		構造部	シール部
f. 配管貫通部	貫通配管	延性破壊	—
	スリーブ	延性破壊, 座屈	—
	端板	延性破壊	—
	ボルト締付平板	延性破壊	—
	フランジ	延性破壊	開口, シール能力低下
	締付ボルト	延性破壊	—
	閉止板	延性破壊	—
	伸縮継手	疲労破壊	—
	短管	延性破壊	—
g. 電気配線貫通部	スリーブ	延性破壊	—
	アダプタ	延性破壊	—
	ヘッダ	延性破壊	—
	モジュール	—	変形, シール能力低下
h. 原子炉格納容器隔離弁	耐圧部材	延性破壊	—
	シール部	—	シール能力低下

(3) 評価方法

評価対象について、放射性物質の閉じ込め機能を確認するための判断基準を設定し、以下のいずれかの方法により評価し、200°C、2Pd の環境下での構造健全性、シール機能維持を確認する。

- a. 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）JSME S NC1-2005/2007）（以下、「設計・建設規格」という。）又は既工事計画認可申請書（以下、「既工認」という。）等に準拠した評価
- b. 設計・建設規格の準用等による評価
- c. 電力会社等による共同研究（以下、「電共研」という。）、（財）原子力発電技術機構（以下、「NUPEC」という。）等での試験又は解析結果等を活用した評価

評価対象の評価方法を第 1.3-2 図に、評価対象の評価内容を第 1.3-2 表に示す。



第 1.3-2 図 評価対象の評価方法

第 1.3-2 表 評価対象の評価内容

評価対象機器		想定される機能喪失要因	評価方法*1	評価方法の概要*2	判定基準*2
原子炉格納容器本体	胴部等	延性破壊 (構造・形状不連続部)	c	代表プラントの原子炉格納容器全体構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		延性破壊 (一般部)	b	設計・建設規格 (PVE-3230 他) を準用し、200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		延性破壊 (ドライウェル基部)	b	既工認の評価値を用いて 200℃、2Pd における発生応力を評価	200℃、2Pd における発生応力が許容応力以下であること
	ベント管 ベローズ	疲労破壊	a	設計・建設規格 (PVE-3810) に準拠し、疲労累積係数を評価	疲労累積係数が 1 以下であること
ドライウェル主フランジ		延性破壊 (フランジ及び締付ボルト)	c	代表プラントの主フランジ構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		開口、シール能力低下	c	実機モデルの有限要素法による変形量評価及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	200℃、2Pd における開口量が許容開口量以下であること
機器搬出入用ハッチ		延性破壊 (円筒胴取付部)	c	代表プラントのペネトレーション構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		延性破壊 (円筒胴)	b	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		座屈 (鏡板)	b	機械工学便覧の座屈評価式を準用し、許容圧力 (座屈圧力) を評価	200℃における許容圧力 (座屈圧力) が 2Pd 以上であること
		変形、シール能力低下	c	実機モデルの有限要素法による変形量評価及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	200℃、2Pd における変形量が許容変形量以下であること
所員用エアロック		延性破壊 (扉及び隔壁)	b	既工認の評価値を用いて、200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		延性破壊 (円筒胴)	b	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
		変形、シール能力低下 (扉のシール部)	b	機械工学便覧のはりのたわみ計算式による変形量及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	200℃、2Pd における変形量が許容変形量以下であること
		シール能力低下 (扉以外のシール部)	c	PEEK 材の材料特性及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	耐熱温度が 200℃以上であること

評価対象機器	想定される機能喪失要因	評価方法*1	評価方法の概要*2	判定基準*2
逃がし安全弁搬出入口	延性破壊 (円筒胴及び鏡板)	b	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (フランジ及びヒンジボルト)	c	代表ブランドのハッチタイプフランジ構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	開口, シール能力低下	c	代表ブランドのハッチタイプフランジ構造の開口量評価及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	200℃, 2Pd における開口量が許容開口量以下であること
配管貫通部	延性破壊 (貫通配管, 貫通部)	b	代表配管について, 設計・建設規格 (PPC-3530) を準用し, 200℃, 2Pd における一次+二次応力を評価 許容応力を超過する場合は, 設計・建設規格 (PPB-3535) に準拠し, 疲労累積係数を評価	一次+二次応力が許容応力以下であること 許容応力を超過する場合は, 疲労累積係数が 1 以下であること
	延性破壊 (スリーブ)	b	設計・建設規格 (PVE-3611) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	座屈 (スリーブ)	b	設計・建設規格 (PVE-3612) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (端板)	b	設計・建設規格 (PVE-3410) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (ボルト締付平板)	b	設計・建設規格 (PVE-3410) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (フランジ)	b	JIS B 8265-2003 を適用し, 2Pd におけるフランジの発生応力を評価	発生応力が許容応力以下であること
	延性破壊 (締付ボルト)	b	JIS B 8265-2003 を適用し, 200℃, 2Pd におけるボルトの所要総断面積を評価	所要総断面積がボルト総断面積以下であること
	開口, シール能力低下 (フランジ部)	c	一般式によるフランジ開口量評価及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	200℃, 2Pd における開口量が許容開口量以下であること
	延性破壊 (閉止板)	b	設計・建設規格 (PVE-3410) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	疲労破壊 (伸縮継手)	a	設計・建設規格 (PVE-3810) に準拠し, 疲労累積係数を評価	疲労累積係数が 1 以下であること
	延性破壊 (短管)	b	設計・建設規格 (PVE-3611) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
電気配線貫通部	延性破壊 (スリーブ)	b	「配管貫通部 (スリーブ)」に合わせて評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (アダプタ)	b	設計・建設規格 (PVE-3611) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	延性破壊 (ヘッド)	b	設計・建設規格 (PVE-3410) を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価	200℃における許容圧力が 2Pd 以上であること
	変形, シール能力低下 (モジュール)	c	原子炉格納容器電気ペネトレーションの特性・健全性確認試験結果を用いて, シール性が確保されることを評価	200℃, 2Pd においてシール機能を維持すること

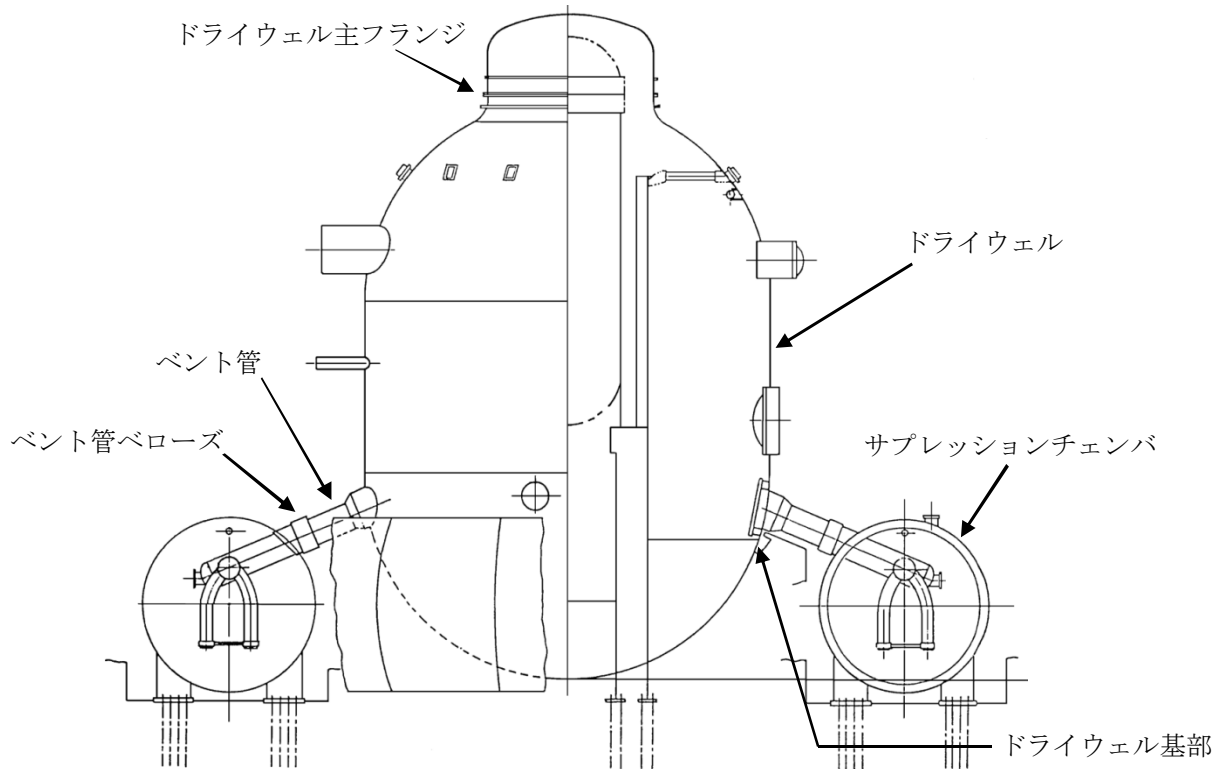
評価対象機器		想定される機能喪失要因	評価方法*1	評価方法の概要*2	判定基準*2
原子炉格納容器隔離弁	原子炉格納容器調気系パタフライ弁	延性破壊 (耐圧部材)	a	弁の圧力レーティング設計により、200℃における許容圧力を評価	200℃における許容圧力が2Pd 以上であること
		シール能力低下	c	改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果及び蒸気加熱漏えい試験結果により評価	耐熱温度が 200℃以上であり、シール機能を維持すること
	移動式炉心内計装系電磁弁	延性破壊 (耐圧部材)	a	弁の圧力レーティング設計により、200℃における許容圧力を評価	200℃における許容圧力が2Pd 以上であること
		シール能力低下	c	改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	耐熱温度が 200℃以上であり、シール機能を維持すること
	移動式炉心内計装系ボール弁	延性破壊 (耐圧部材)	a	弁の圧力レーティング設計により、200℃における許容圧力を評価	200℃における許容圧力が2Pd 以上であること
		シール能力低下	c	PEEK 材の材料特性及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	耐熱温度が 200℃以上であり、シール機能を維持すること

- * 1 a : 設計・建設規格又は既工認等に準拠した評価
b : 設計・建設規格の準用等による評価
c : 電共研等での試験又は解析結果等を活用した評価
- * 2 許容圧力 : 設備の機能が維持される最大の負荷圧力

(4) 評価結果の概要

a. 原子炉格納容器本体

原子炉格納容器本体は、鋼製の上下部半球円筒形ドライウェル、円環形サプレッションチェンバ、これらを連結するベント管及びベント管ベローズからなる。原子炉格納容器本体構造図を第1.3-3図に示す。



第1.3-3図 原子炉格納容器本体構造図

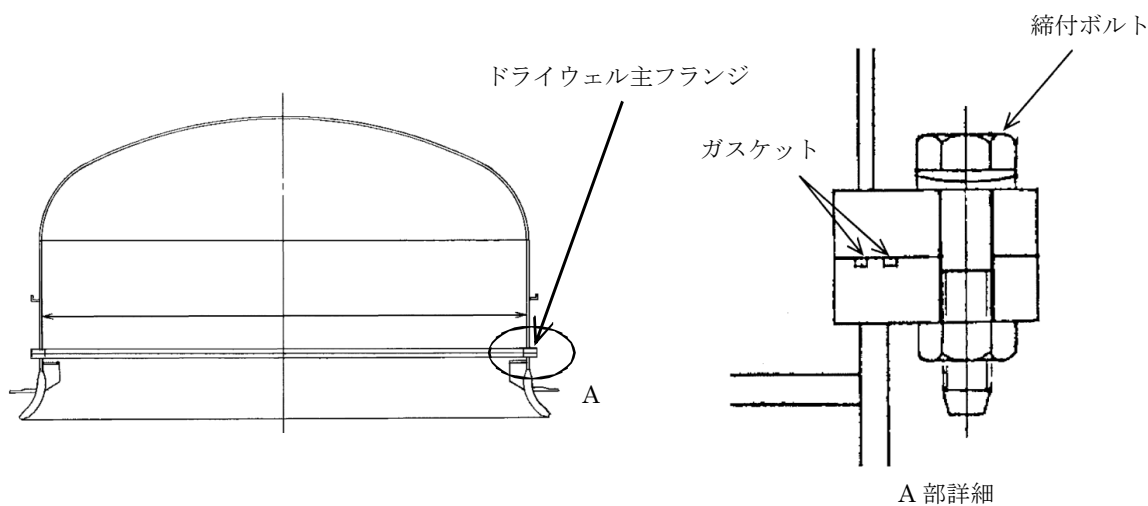
200℃、2Pdにおける原子炉格納容器本体の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形やドライウェル基部を固定端とする熱変形に伴う延性破壊が想定される。また、ベント管ベローズには、通常運転時に累積される低サイクル疲労に加え、200℃、2Pdにより累積される低サイクル疲労による疲労破壊が想定される。

このため、原子炉格納容器バウンダリとなる耐圧部材及びドライウェル基部の延性破壊、ベント管ベローズの疲労破壊について評価し、女川原子力発電所2号炉の原子炉格納容器本体が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- 200℃における原子炉格納容器本体の許容圧力は、電共研での解析結果に基づく評価から約4.4Pd以上、設計・建設規格に基づく評価から約2.6Pd以上である。
- ドライウェル基部の一次+二次応力は MPaであり、許容応力（501MPa）以下である。
- ベント管ベローズの疲労累積係数は であり、許容値（疲労累積係数1）以下である。

b. ドライウェル主フランジ

ドライウェル主フランジは、上鏡部のフランジと原子炉格納容器本体部のフランジを締付ボルトで固定しており、フランジ間をガスケットにてシールしている。ドライウェル主フランジ概略図を第1.3-4図に示す。



第1.3-4図 ドライウェル主フランジ概略図

シール部は、内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい、フランジ開口の進展による締付ボルトの破損が想定される。また、シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し、シール能力が低下することが想定される。

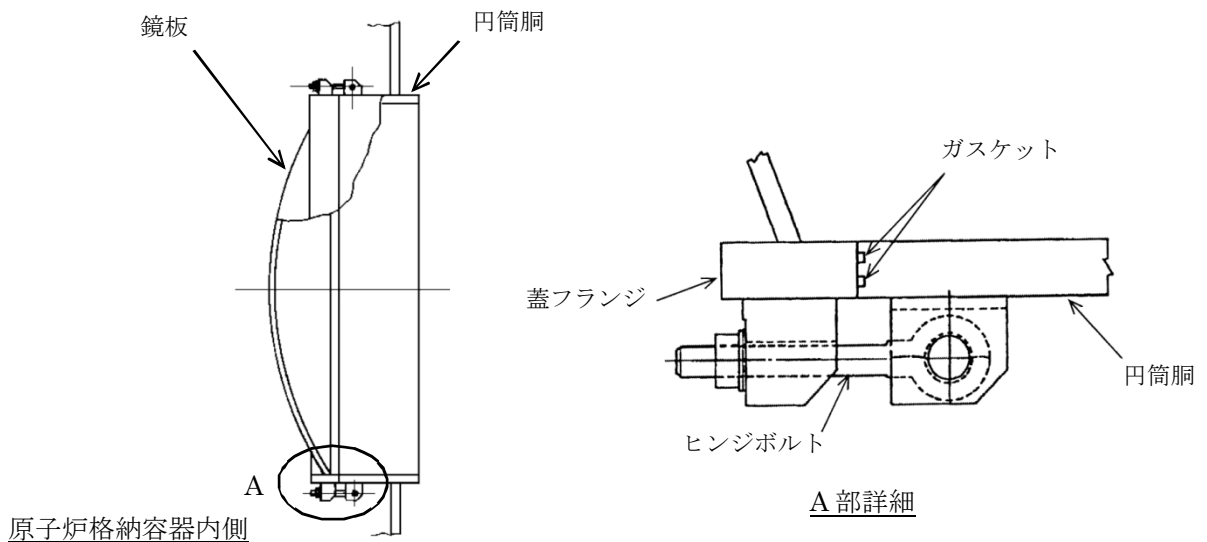
このため、ドライウェル主フランジについて、フランジ及び締付ボルトの延性破壊、また、シール能力低下による漏えいを評価し、女川原子力発電所2号炉

のドライウェル主フランジが、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃におけるドライウェル主フランジの許容圧力は、約3.9Pd以上である。
- ・200℃、2Pdにおけるドライウェル主フランジの開口量は約 mm であり、改良EPDM材のガスケットの許容開口量 (mm) 以下である。

c. 機器搬出入用ハッチ

機器搬出入用ハッチは、鏡板、蓋フランジ、フランジ付の円筒胴及びヒンジボルトからなり、原子炉格納容器の貫通部にフランジ付の円筒胴を溶接固定し、フランジ間にはシール溝が二重に配置されており、それぞれにガスケットを挟み込み、ヒンジボルトで締め付けシールする構造である。機器搬出入用ハッチ概略図を第1.3-5図に示す。



第1.3-5図 機器搬出入用ハッチ概略図

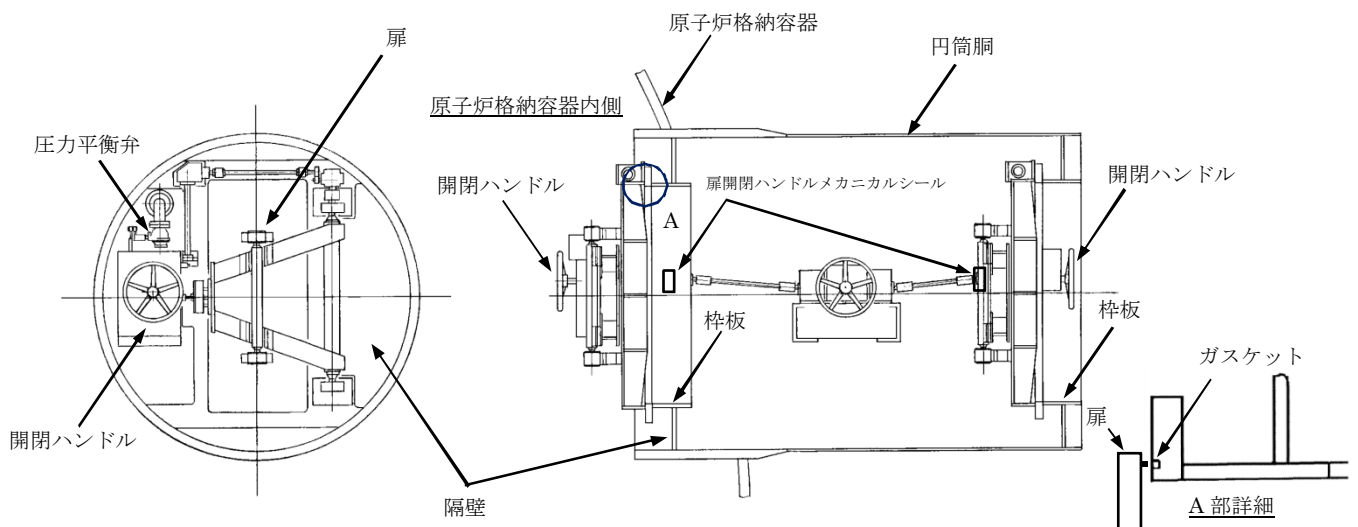
200℃、2Pdにおける機器搬出入用ハッチの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、板厚に対し球殻の半径が大きい鏡板の座屈、原子炉格納容器本体の変形に伴う円筒胴の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいが想定される。

このため、機器搬出入用ハッチについて、円筒胴取付部及び円筒胴の延性破壊、鏡板の座屈、円筒胴の変形に伴うガスケットのシール能力低下による漏えいを評価し、女川原子力発電所2号炉の機器搬出入用ハッチが、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃における円筒胴取付部の許容圧力は、約4.1Pd以上である。
- ・200℃における円筒胴の許容圧力は約7.6Pdであり、鏡板の許容圧力（座屈圧力）は約 Pdである。
- ・200℃、2Pdにおけるフランジ部の軸方向開口量は、 mmであり、改良EPDM材のガスケットの許容変形量（復元量）約 mm以下である。

d. 所員用エアロック

所員用エアロックは、扉、隔壁、円筒胴及び開閉ハンドルからなる。原子炉格納容器の貫通部に円筒胴を溶接固定し、円筒胴の両端に人が出入りする開口部を設けた隔壁を溶接している。この開口部に枠板を溶接し、枠板の前面を扉で塞ぎ、枠板と扉間にガスケットを挟み込みシールする構造である。また、隔壁には扉開閉ハンドル軸等が貫通しており、貫通部にシール材を使用している。所員用エアロック概略図を第 1.3-6 図に示す。



第 1.3-6 図 所員用エアロック概略図

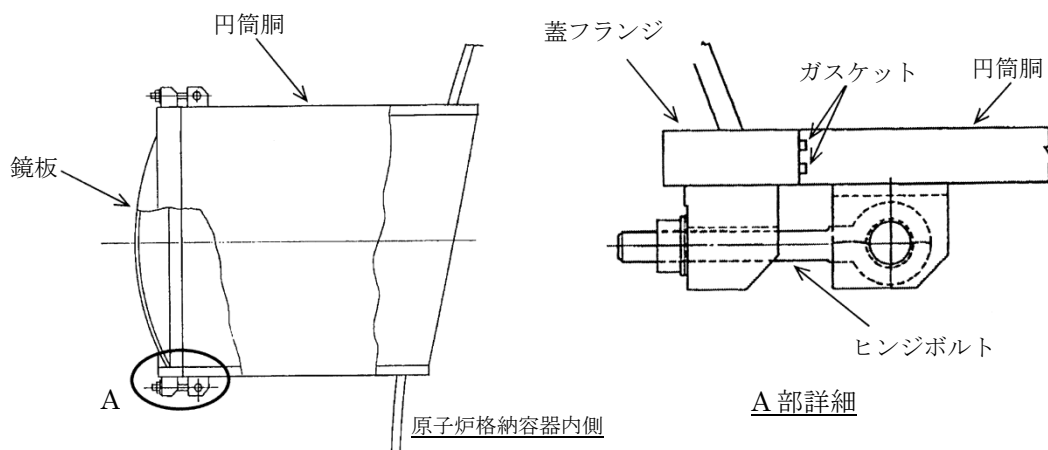
200°C、2Pdにおける所員用エアロックの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、また、扉の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいが想定される。

このため、所員用エアロックについて、扉及び隔壁並びに円筒胴の延性破壊、扉の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいを評価し、女川原子力発電所2号炉の所員用エアロックが、200°C、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200°Cにおける扉及び隔壁の許容圧力は約□Pd以上であり、円筒胴の許容圧力は約8.0Pd以上である。
- ・200°C、2Pdにおける扉の変形量は□mmであり、改良EPDM材のガスケットの許容変形量（□mm）以下である。
- ・貫通部シール材（改良EPDM材、PEEK材）は、試験、材料仕様から200°C、2Pdへの耐性を有する。

e. 逃がし安全弁搬出入口

逃がし安全弁搬出入口は、鏡板、蓋フランジ、円筒胴及びヒンジボルトからなり、蓋フランジと円筒胴の間にガスケットを挟み込み、ヒンジボルトで締め付けシールする構造である。逃がし安全弁搬出入口概略図を第1.3-7図に示す。



第1.3-7図 逃がし安全弁搬出入口概略図

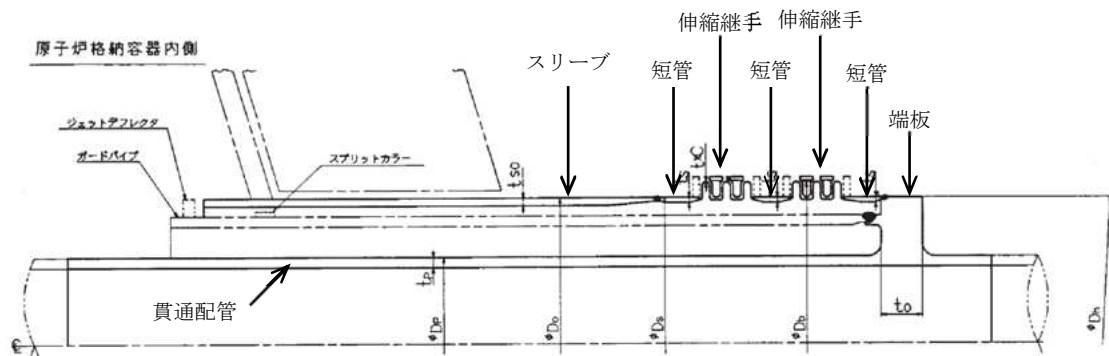
シール部は、内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい、フランジ開口の進展によるヒンジボルトの破損が想定される。また、シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し、シール能力が低下することが想定される。

逃がし安全弁搬出入口について、円筒胴、鏡板、フランジ及びヒンジボルトの延性破壊、また、シール部のフランジ開口及びシール能力低下による漏えいを評価し、女川原子力発電所2号炉の逃がし安全弁搬出入口が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃における鏡板及び円筒胴の許容圧力は、約19.6Pd 以上である。
- ・200℃におけるフランジ及びヒンジボルトの許容圧力は、約4.1Pdである。
- ・200℃、2Pdにおけるフランジの開口量は□mmであり、改良EPDM材のガスケットの許容開口量（□mm）以下である。

f. 貫通配管

貫通配管は、スリーブ等を介して原子炉格納容器本体に溶接構造で取り付けられている。貫通配管概略図を第1.3-8図に示す。



第1.3-8図 貫通配管概略図

200℃、2Pにおける貫通配管の機能喪失要因は、過度な曲げ荷重に伴う延性破壊が想定される。

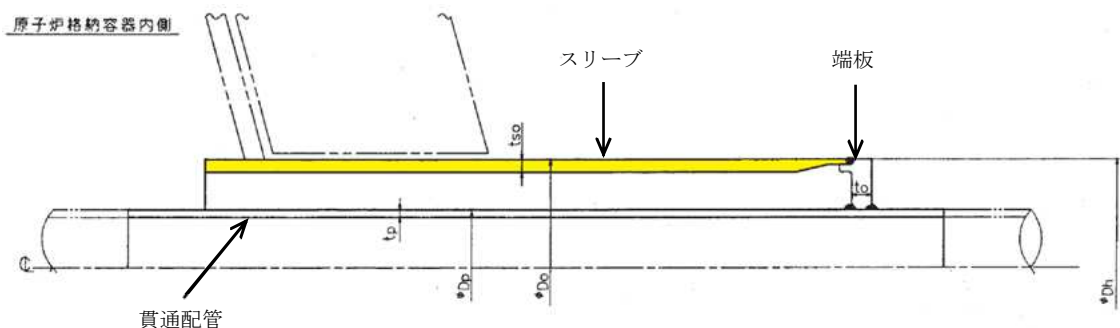
このため、貫通配管においては曲げ荷重に伴う延性破壊を評価する。貫通配

管に作用する荷重により発生する応力は、二次応力に区分されることから、一次+二次応力について許容値を満足することを評価し、女川原子力発電所2号炉の貫通配管が、200°C、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・貫通配管は、一次+二次応力の許容応力を超過するが、疲労累積係数は0.0036であり、許容値（疲労累積係数1）以下である。
- ・貫通部の管台に生じる応力（一次+二次応力）は最大311MPaであり、許容応力（501MPa）以下である。

g. スリーブ

スリーブは、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、原子炉格納容器本体に溶接構造で取り付けられている。スリーブ概略図を第1.3-9図に示す。



第1.3-9図 スリーブ概略図

200°C、2Pdにおけるスリーブの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、内面に圧力を受けるスリーブについては、高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、外面に圧力を受けるスリーブについては座屈が想定される。

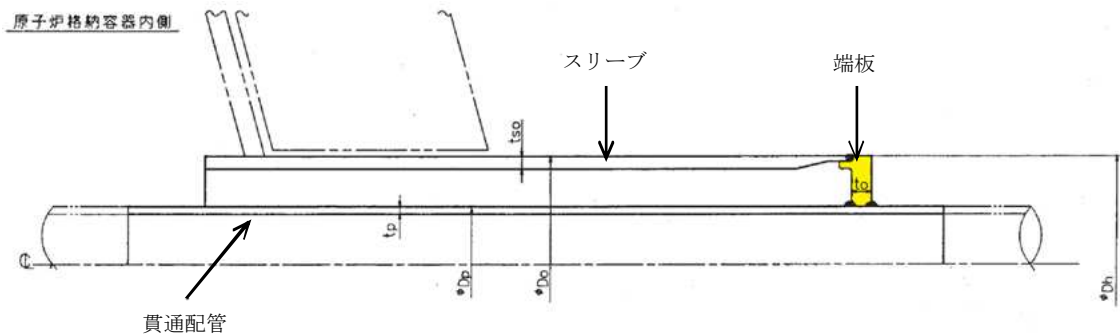
このため、内面に圧力を受けるスリーブについては延性破壊、外面に圧力を受けるスリーブについては座屈を評価し、女川原子力発電所2号炉のスリーブ

が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃における内面に圧力を受けるスリーブの許容圧力は、約37.1Pd以上である。
- ・200℃における外面に圧力を受けるスリーブの許容圧力は、約20.6Pd以上である。

h. 端板

端板は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブに溶接構造で取り付けられている。端板概略図を第1.3-10図に示す。



第1.3-10図 端板概略図

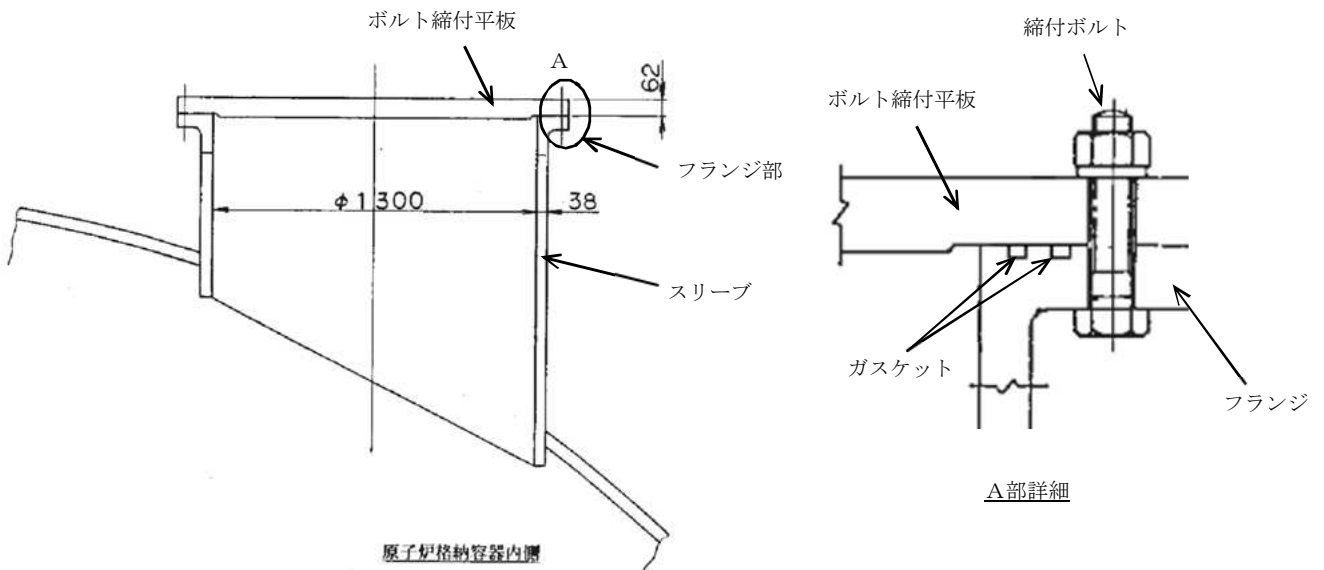
200℃、2Pdにおける端板の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、端板については、耐圧部材の延性破壊を評価し、女川原子力発電所2号炉の端板が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃における端板の許容圧力は、約11.4Pd以上である。

i. フランジ部

フランジ部（フランジ，ボルト締付平板及び締付ボルト）は，原子炉格納容器の貫通部に溶接固定されたフランジとボルト締付平板を締付ボルトで固定している。フランジとボルト締付平板間は，シール溝が二重に配置されており，それぞれにガスケットを挟み込みシールしている。フランジ部概略図を第1.3-11図に示す。



第 1.3-11 図 フランジ部概略図

シール部は，内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい，フランジ開口の進展による締付ボルトの破損が想定される。また，シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し，シール能力が低下することが想定される。

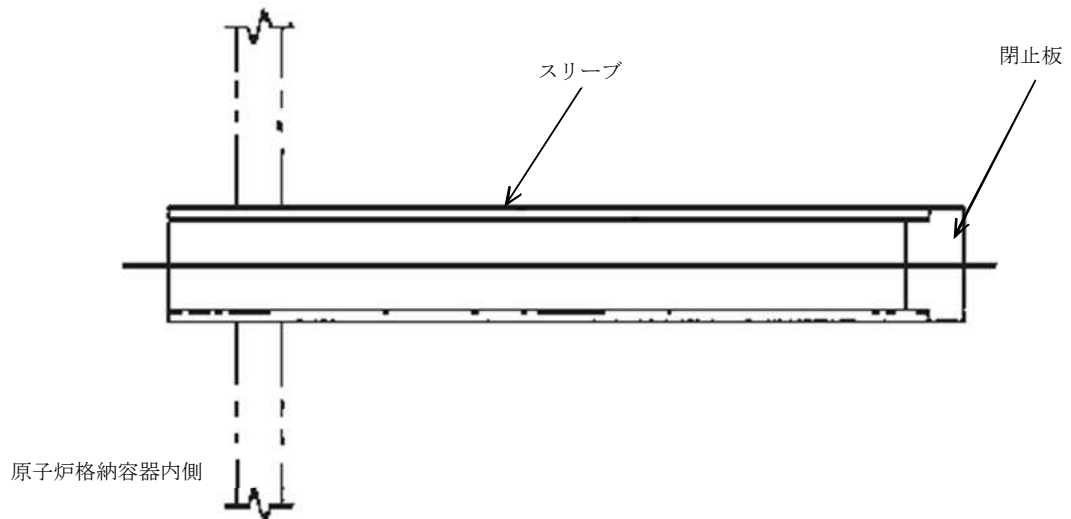
フランジ部について，フランジ，ボルト締付平板及び締付ボルトの延性破壊，また，シール能力低下による漏えいを評価し，女川原子力発電所2号炉のフランジ部が，200℃，2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃におけるボルト締付平板の許容圧力は，約 Pd 以上である。

- ・フランジの発生組合せ応力は、最大 MPa であり、許容応力 (292MPa) 以下である。
- ・締付ボルトの所要総断面積 (mm²) は、実際のボルト総断面積 (mm²) 以下である。
- ・2Pdにおけるフランジ部の開口量は約 mm であり、改良EPDM材のガスケットの許容開口量 (mm) 以下である。

j. 閉止板

閉止板は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブに溶接構造で取り付けられている。閉止板概略図を第1.3-12図に示す。



第1.3-12図 閉止板概略図

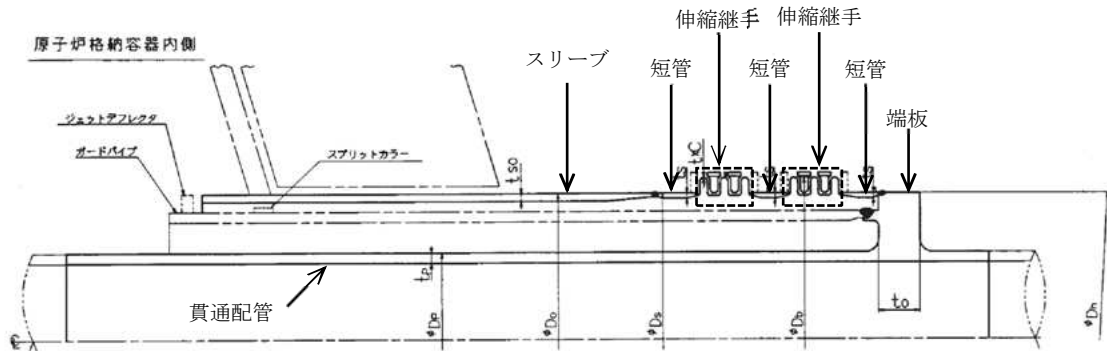
200℃、2Pdにおける閉止板の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、閉止板については、耐圧部材の延性破壊を評価し、女川原子力発電所2号炉の閉止板が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・200℃における閉止板の許容圧力は、約10.8Pd以上である。

k. 伸縮継手

伸縮継手は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、短管に溶接構造で取り付けられている。伸縮継手概略図を第1.3-13図に示す。



第1.3-13図 伸縮継手概略図

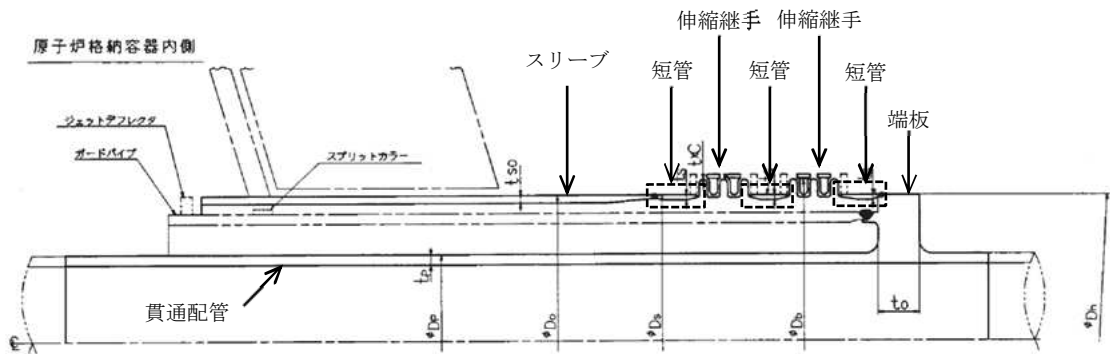
200°C、2Pdにおける伸縮継手の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、通常運転時の繰返し荷重に加えて重大事故時の繰返し荷重が作用することに伴う耐圧部材の疲労破壊が想定される。

このため、伸縮継手について、既工認と同様の評価式を用いて重大事故時の伸縮継手の疲労累積係数を求め、通常運転時の疲労累積係数との合計が1以下であることを確認することで、疲労破壊を評価し、女川原子力発電所2号炉の伸縮継手が、200°C、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

- ・伸縮継手の疲労累積係数は0.1067であり、許容値（疲労累積係数1）以下である。

1. 短管

短管は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブと伸縮継手間、伸縮継手と端板間に溶接構造で取り付けられている。短管概略図を第1.3-14図に示す。



第1.3-14図 短管概略図

200°C、2Pdにおける短管の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、短管については、耐圧部材の延性破壊を評価し、女川原子力発電所2号炉の短管が、200°C、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。

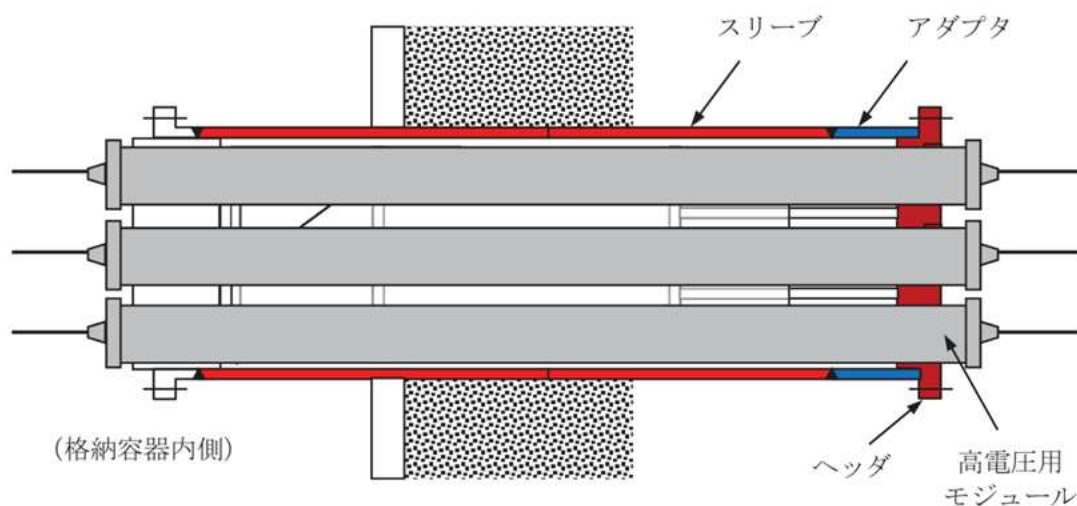
- ・200°Cにおける短管の許容圧力は、約25.0Pd以上である。

m. 電気配線貫通部

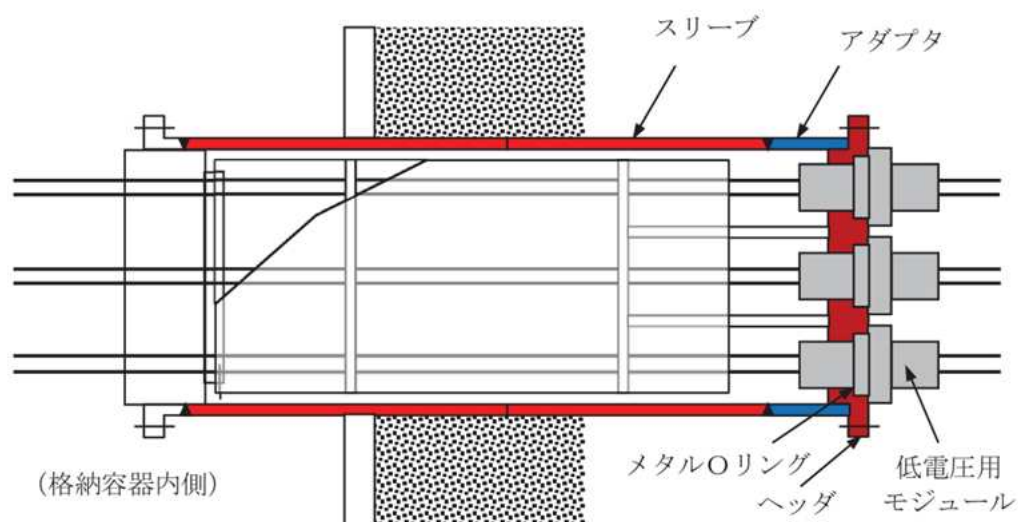
電気配線貫通部には高電圧用と低電圧用の二種類があり、電気配線貫通部本体のヘッドに高電圧用又は低電圧用のモジュールが設置されている。

電気配線貫通部(高電圧)は、スリーブ～アダプタ～ヘッド～モジュール間の溶接部、モジュール内部のエチレンプロピレンゴムにより気密性を維持する構造となっている。

また、電気配線貫通部(低電圧)は、スリーブ～アダプタ間、アダプタ～ヘッド間の溶接、ヘッド～モジュール間のメタルOリングによる金属シールと、モジュール内部のエポキシ樹脂により気密性を維持する構造となっている。電気配線貫通部(高電圧)概略図を第1.3-15図に、電気配線貫通部(低電圧)概略図を第1.3-16図に示す。



第 1.3-15 図 電気配線貫通部（高電圧）概略図



第 1.3-16 図 電気配線貫通部（低電圧）概略図

200℃、2Pdにおける電気配線貫通部の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、アダプタ及びヘッドの高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、モジュールの気密性低下が想定される。

このため、電気配線貫通部のアダプタ及びヘッドについては、耐圧部材の延性破壊、モジュールについては、気密性が確保されることを確認し、女川原子力発電所2号炉の電気配線貫通部が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。なお、電気配線貫通部におけるスリーブの健全性評価は、配管貫通部（スリーブ）にて評価している。

- ・200℃における電気配線貫通部(高電圧)の許容圧力は、アダプタで約30.4Pd、ヘッダで約33.7Pdである。
- ・200℃における電気配線貫通部(低電圧)の許容圧力は、アダプタで約37.0Pd、ヘッダで約69.0Pdである。
- ・既往の電共研、NUPEC及び過去の環境試験の試験結果から、200℃、2Pdにおいてもモジュールの気密性は確保される。

n. 原子炉格納容器隔離弁

原子炉格納容器隔離弁は原子炉格納容器の貫通配管に設置されており、弁箱、弁体、ボンネット及びシール部等により構成している。

原子炉格納容器隔離弁のうち、原子炉格納容器調気系バタフライ弁、移動式炉心内計装系電磁弁及び移動式炉心内計装系ボール弁は、非金属材料シール材を使用しており、200℃、2Pdの環境下における劣化によるシール能力低下が想定される。また、弁の耐圧部材については、高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

このため、原子炉格納容器隔離弁のうち、原子炉格納容器調気系バタフライ弁、移動式炉心内計装系電磁弁及び移動式炉心内計装系ボール弁について、シール能力及び延性破壊を評価し、女川原子力発電所2号炉の原子炉格納容器隔離弁が、200℃、2Pdにおいて放射性物質の閉じ込め機能を確保できることを確認した。なお、その他の原子炉格納容器隔離弁については、レーティング設計に基づき弁の選定をしていること、シール部には金属製又は黒鉛製等の耐熱性に優れたものを使用しているため、200℃、2Pdの環境下における健全性を有している。

(a) 原子炉格納容器調気系バタフライ弁

原子炉格納容器調気系バタフライ弁の概略図を，第1.3-17図に示す。



第1.3-17図 原子炉格納容器調気系バタフライ弁概略図

隔離機能については，原子炉格納容器調気系バタフライ弁は，弁座シート部にEPDM材を使用しており，シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

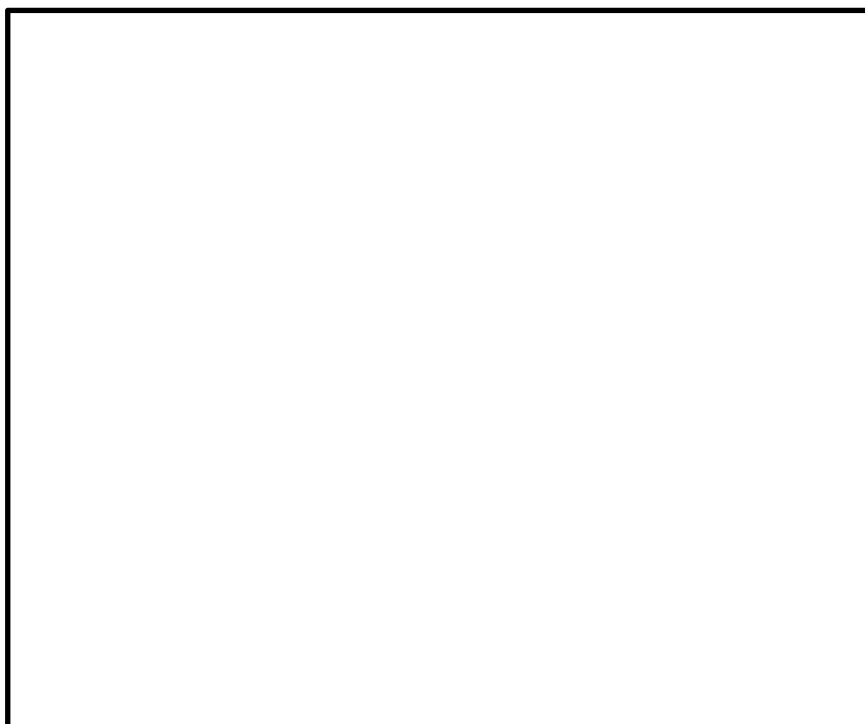
このため，弁座シート部については，より耐熱性能を向上させた改良EPDM材への変更を実施することとしているため，シール機能が確保されることを確認した。

また，耐圧機能については，弁の圧力クラスを確認し，200℃，2Pdの環境下における耐圧機能を確認し，耐圧機能が維持されることを確認した。

- ・改良EPDM材を用いた圧縮永久ひずみ試験の結果及び蒸気加熱漏えい試験の結果より，200℃，2Pdの環境下においても，シール機能を確保可能である。
- ・原子炉格納容器調気系バタフライ弁の圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり，200℃における許容圧力は1.40MPa(約3.2Pd)であることから，200℃，2Pdの環境下においても，耐圧機能が維持される。

(b) 移動式炉心内計装系電磁弁

移動式炉心内計装系電磁弁の概略図を、第1.3-18図に示す。



第1.3-18図 移動式炉心内計装系電磁弁概略図

隔離機能については、移動式炉心内計装系電磁弁は、弁体シート部及び弁ふたシール部にEPDM材を使用しており、シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

このため、弁体シート部及び弁ふたシール部については、200℃、2Pdの環境下における健全性を有している金属製シートへの変更、若しくはより耐熱性能を向上させた改良EPDM材への変更を実施することとしているため、シール機能が確保されることを確認した。

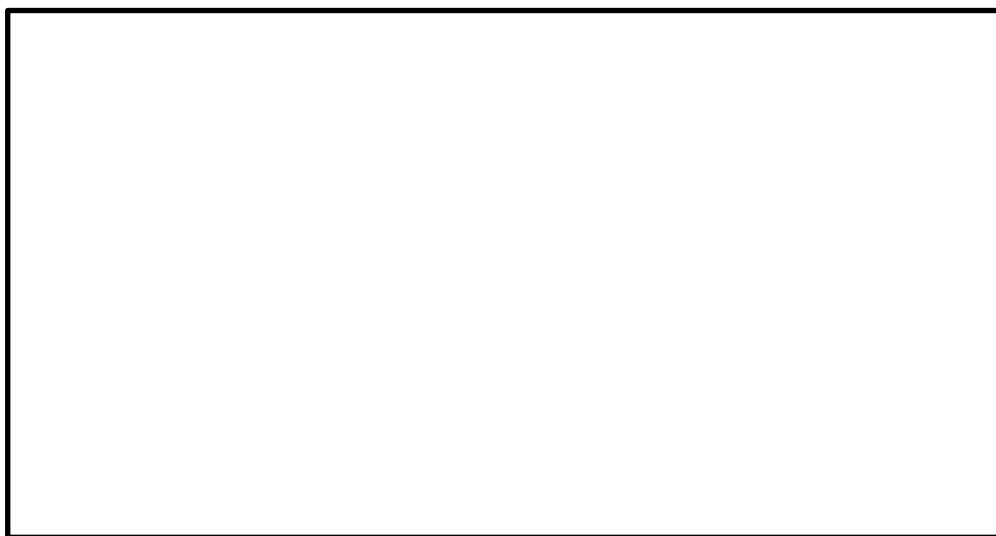
また、耐圧機能については、弁の圧力クラスを確認し、200℃、2Pdの環境下における耐圧機能を確認し、耐圧機能が維持されることを確認した。

- ・金属製シートは、メタルタッチ構造のため、200℃、2Pdの環境下においても、シール機能を確保可能である。
- ・改良EPDM材を用いた圧縮永久ひずみ試験の結果より、200℃、2Pdの環境下においても、シール機能を確保可能である。

- ・移動式炉心内計装系電磁弁の圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり, 200°Cにおける許容圧力は1.46MPa(約3.4Pd)であることから, 200°C, 2Pdの環境下においても, 耐圧機能が維持される。

(c) 移動式炉心内計装系ボール弁

移動式炉心内計装系ボール弁の概略図を, 第1.3-19図に示す。



第1.3-19図 移動式炉心内計装系ボール弁

隔離機能については, 移動式炉心内計装系ボール弁は, 弁座シート部にフッ素樹脂, 弁ふたシール部にシリコンゴムを使用しており, シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

このため, 弁座シート部及び弁ふたシール部については, より耐性の高いPEEK材又は改良EPDM材への変更を実施することとしているため, シール機能が確保されることを確認した。

また, 耐圧機能については, 弁の圧力クラスを確認し, 200°C, 2Pdの環境下における耐圧機能を確認し, 耐圧機能が維持されることを確認した。

- ・PEEK材の一般的な材料特性より, PEEK材は200°C以上の耐高温性があり, シール機能を確保可能である。
- ・改良EPDM材を用いた圧縮永久ひずみ試験の結果より, 200°C, 2Pdの環境

下においても，シール機能を確保可能である。

- ・ 移動式炉心内計装系ボール弁の圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり，200℃における許容圧力は1.32MPa(約3.0Pd)であることから，200℃，2Pdの環境下においても，耐圧機能が維持される。

1.4 結論

女川原子力発電所 2 号炉の原子炉格納容器本体，ドライウエル主フランジ，原子炉格納容器の開口部（機器搬出入用ハッチ，所員用エアロック及び逃がし安全弁搬出入口），原子炉格納容器貫通部（配管貫通部，電気配線貫通部）及び原子炉格納容器隔離弁について，200℃，2Pd の環境下での構造健全性を確認した。また，ドライウエル主フランジ等のシール部についても，事故後の一定期間について事故環境下での機能維持を確認した。

今回の評価において裕度が最も小さいサプレッションチェンバ円筒胴とドライウエル主フランジのシール材から，それぞれ設計・建設規格の準用により求めた破損の判定境界と，電共研等において現時点までに得られているデータに基づく漏えいの判定境界に対して，限界温度，限界圧力として設定した 200℃，2Pd は裕度が確保されている。（添付 1.4-1）

原子炉格納容器の閉じ込め機能に関する漏えい・破損圧力－温度線図を第 1.4-1 図に，評価結果のまとめを第 1.4-1 表に示す。



- ①構造部は破損せず，シール部からの漏えいが発生していないと判定している範囲
- ②構造部は破損せず，シール部からの漏えいが発生すると判定している範囲
- ③構造部の破損が発生していると判定している範囲

第 1.4-1 図 原子炉格納容器の閉じ込め機能に関する漏えい・破損圧力－温度線図

第1.4-1表 評価結果のまとめ

評価対象	評価部位	評価方法の概要	評価値	判定値
原子炉格納容器本体	構造・形状不連続部	代表プラントの原子炉格納容器全体構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	約4.4Pd ~ 6.0Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	一般部	設計・建設規格 (PVE-3230他) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約2.6Pd以上 (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	ドライウェル基部	既工認の評価値を用いて200℃、2Pdにおける発生応力を評価	□ MPa (一次+二次応力)	501MPa以下
	ベント管ペローズ	設計・建設規格 (PVE-3810) に準拠し、疲労累積係数を評価	□ (疲労累積係数)	1以下
ドライウェル主フランジ	フランジ及び締付ボルト	代表プラントの主フランジ構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	約3.9Pd ~ 4.4Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	シール部	実機モデルの有限要素法による変形量評価及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	約 □ mm (開口量)	許容開口量 (□ mm) 以下
機器搬出入用ハッチ	円筒胴取付部	代表プラントのペネトレーション構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	約4.1Pd ~ 4.7Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	円筒胴	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約7.6Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	鏡板	機械工学便覧の座屈評価式を準用し、許容圧力 (座屈圧力) を評価	約 □ Pd (許容圧力 (座屈圧力))	2Pd (0.854MPa) 以上
	シール部	実機モデルの有限要素法による変形量評価及び改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	□ mm (変形量 (開口量))	許容変形量 (□ mm) 以下

補足 19-31

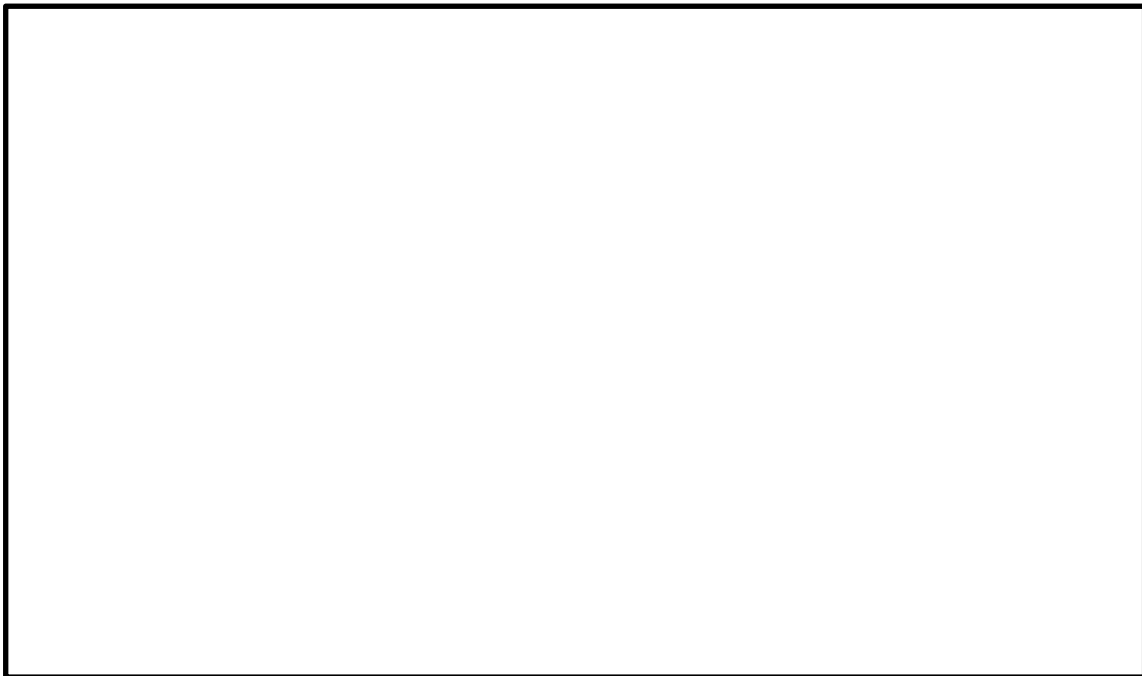
評価対象	評価部位	評価方法の概要	評価値	判定値
所員用エアロック	扉及び隔壁	既工認の評価値を用いて、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約□ Pd以上 (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	円筒胴	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約8.0Pd以上 (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	扉のシール部	機械工学便覧のはりのたわみ計算式による変形量及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	□ mm (開口量)	許容開口量 (□ mm) 以下
	扉以外のシール部	PEEK 材の材料特性及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	・200℃で耐性あり (改良EPDM材) ・250℃ (PEEK材)	200℃以上
逃がし安全弁搬出入口	円筒胴及び鏡板	設計・建設規格 (PVE-3230) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約19.6Pd以上 (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	フランジ及びヒンジボルト	代表プラントのハッチタイプフランジ構造の解析結果を適用し、許容圧力を評価	約4.1Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	シール部	代表プラントのハッチタイプフランジ構造の開口量評価及び改良 EPDM材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	□ mm (開口量)	許容開口量 (□ mm) 以下
配管貫通部	貫通配管	代表配管について、設計・建設規格 (PPC-3530) を準用し、200℃、2Pd における一次+二次応力を評価 許容応力を超過する場合は、設計・建設規格 (PPB-3535) に準拠し、疲労累積係数を評価	0.0036 (疲労累積係数)	1以下
	貫通部	代表配管について、設計・建設規格 (PPC-3530) を準用し、200℃、2Pd における一次+二次応力を評価 許容応力を超過する場合は、設計・建設規格 (PPB-3535) に準拠し、疲労累積係数を評価	311MPa (一次+二次応力)	501MPa以下
	スリーブ	設計・建設規格 (PVE-3611) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約37.1Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
		設計・建設規格 (PVE-3612) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約20.6Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	端板	設計・建設規格 (PVE-3410) を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約11.4Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上

評価対象	評価部位	評価方法の概要	評価値	判定値
配管貫通部（フランジ部）	ボルト締付平板	設計・建設規格(PVE-3410)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約 <input type="text"/> Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	フランジ	JIS B 8265-2003を適用し、2Pdにおけるフランジの発生組合せ応力を評価	<input type="text"/> MPa	292MPa以下
	締付ボルト	JIS B 8265-2003を適用し、200℃、2Pdにおけるボルトの所要総断面積を評価	<input type="text"/> mm ² (所要総断面積)	総断面積 (<input type="text"/> mm ²) 以下
	シール部	一般式によるフランジ開口量評価及び改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価	約 <input type="text"/> mm (開口量)	許容開口量 (<input type="text"/> mm) 以下
配管貫通部（閉止板）	閉止板	設計・建設規格(PVE-3410)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約10.8Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
配管貫通部（伸縮継手）	伸縮継手	設計・建設規格(PVE-3810)に準拠し、疲労累積係数を評価	0.1067 (疲労累積係数)	1以下
配管貫通部（短管）	短管	設計・建設規格(PVE-3611)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	約25.0Pd (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
電気配線貫通部	スリーブ	「配管貫通部 スリーブ」に合わせて評価	—	—
	アダプタ	設計・建設規格(PVE-3611)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	・高電圧：約30.4Pd ・低電圧：約37.0Pd	2Pd (0.854MPa) 以上
	ヘッド	設計・建設規格(PVE-3410)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価	・高電圧：約33.7Pd ・低電圧：約69.0Pd	2Pd (0.854MPa) 以上
	モジュール	電共研及びNUPECの原子炉格納容器電気ペネトレーションの特性・健全性確認試験結果を用いて、シール性が確保されることを評価	漏えいなし	気密性を維持すること
原子炉格納容器隔離弁	弁箱	弁の圧力レーティング設計により、200℃における許容圧力を評価	約3.0Pd以上 (許容圧力)	2Pd (0.854MPa) 以上
	シール材	PEEK材の材料特性、改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験結果及び蒸気加熱漏えい試験結果により評価	・200℃で耐性あり（改良EPDM材） ・250℃（PEEK材） ・漏えいなし	200℃以上 シール機能維持

原子炉格納容器の閉じ込め機能に関する漏えい・破損圧力－温度線図

原子炉格納容器の限界温度，限界圧力は，設計・建設規格の準用による評価や電共研等において現時点までに得られているデータに基づき，原子炉格納容器の閉じ込め機能を評価して設定している。

原子炉格納容器の閉じ込め機能に関する漏えい・破損圧力－温度線図を第 1.4-1-1 図に示す。



- ①構造部は破損せず，シール部からの漏えいが発生していないと判定している範囲
- ②構造部は破損せず，シール部からの漏えいが発生すると判定している範囲
- ③構造部の破損が発生していると判定している範囲

第 1.4-1-1 図 原子炉格納容器の閉じ込め機能に関する漏えい・破損圧力－温度線図

この線図は，原子炉格納容器の閉じ込め機能に影響を及ぼす機能喪失要因を考慮し，損傷の可能性を圧力・温度範囲に応じて分類したものである。

線(a)は原子炉格納容器構造部の破損判定境界，線(b)はシール部の漏えい判定境界であり，線(b)が原子炉格納容器の閉じ込め機能に影響を及ぼす境界となる。

【線(a)】 原子炉格納容器構造部の破損判定境界

構造部のうち、200℃における許容圧力が最も低いサプレッションチェンバ円筒胴に対し、設計・建設規格の評価式を準用し求めた許容応力を、構造部の破損判定の境界線としたものである。この境界線よりも、温度、圧力が低い範囲は、構造部が破損しないと判断できることを示している。

【線(b)】 シール部（ドライウェル主フランジ）の漏えい判定境界

シール部のうち、最も開口裕度の小さいドライウェル主フランジに対して、200℃、225℃、250℃における168時間の改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果及び解析により求めた開口量を用いて、許容開口量を上回る圧力を漏えい判定の境界線*としたものである。この境界線よりも、温度、圧力が低い範囲は、シール部からの漏えいがないと判断できることを示している。

*：200℃未満について改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果がないため、保守的に200℃と同等としている。

2 評価

2.1 原子炉格納容器本体

(1) 評価部位

原子炉格納容器本体は、鋼製の上下部半球円筒形のドライウエル、円環形のサプレッションチェンバ、これらを連結するベント管及びベント管ベローズからなる。

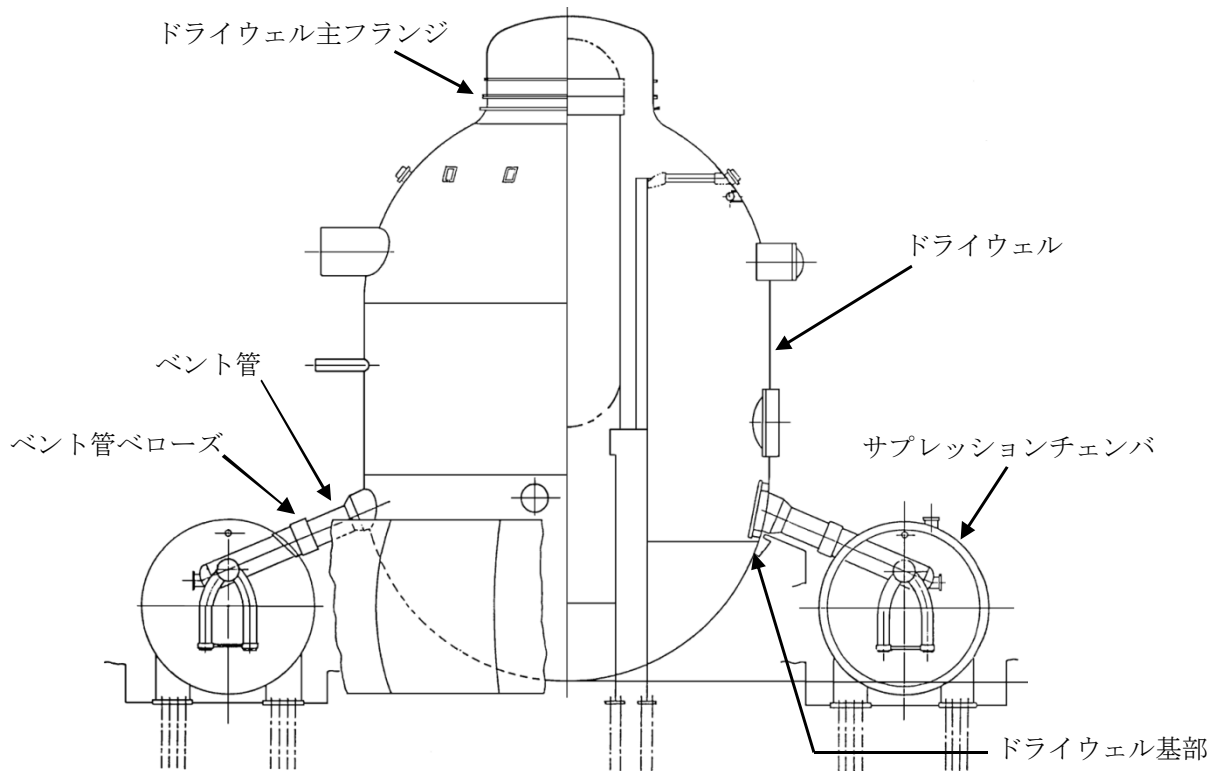
原子炉格納容器本体の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、評価条件 200℃、2Pd においては、脆性破壊が生じる温度域でないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pd における原子炉格納容器本体の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形やドライウエル基部*を固定端とする熱変形に伴う延性破壊が想定される。また、ベント管ベローズには、通常運転時に累積される低サイクル疲労に加え、200℃、2Pd により累積される低サイクル疲労による疲労破壊が想定される。

このため、原子炉格納容器バウンダリとなる耐圧部材及びドライウエル基部の延性破壊、ベント管ベローズの疲労破壊について評価する。

原子炉格納容器本体の構造を第 2.1-1 図に示す。

*：女川原子力発電所 2 号炉の原子炉格納容器は鋼製自立型であり、周囲を囲むコンクリート製の遮へい壁との間に適切なギャップを設けている。このため、重大事故時に変形を拘束されることにより発生する応力は、常時コンクリート部に拘束されているドライウエル基部が高くなると考えられる。



第 2.1-1 図 原子炉格納容器本体の構造

(2) 評価方針

電共研において実施した代表プラントの原子炉格納容器全体構造解析結果を用いて、200℃において耐圧部材の機能が維持できる負荷圧力（許容圧力）を算出し、2Pd 以上であることを確認する。

また、設計・建設規格を準用し既工認と同様の評価式を用いて、200℃における許容圧力を算出し 2Pd 以上であること、ベント管ベローズについて通常運転時、試験状態及び 200℃、2Pd における疲労累積係数の合計が 1 以下であることを確認する。

(添付 2.1-1)

ドライウェル基部について既工認の評価値を用いて 200℃、2Pd における発生応力を算出し、許容応力以下であることを確認する。

原子炉格納容器本体の評価対象と評価方法を第 2.1-1 表に示す。

第 2.1-1 表 原子炉格納容器本体の評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
胴部等	延性破壊	<ul style="list-style-type: none"> 電共研（代表プラントの原子炉格納容器全体構造解析）の結果を用いて，許容圧力を評価 設計・建設規格（PVE-3230 他）を準用し，200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価
ベント管ベローズ	疲労破壊	<ul style="list-style-type: none"> 設計・建設規格（PVE-3810）に準拠し，疲労累積係数を評価
ドライウェル基部	延性破壊	<ul style="list-style-type: none"> 既工認の評価値を用いて 200℃，2Pd における発生応力を評価

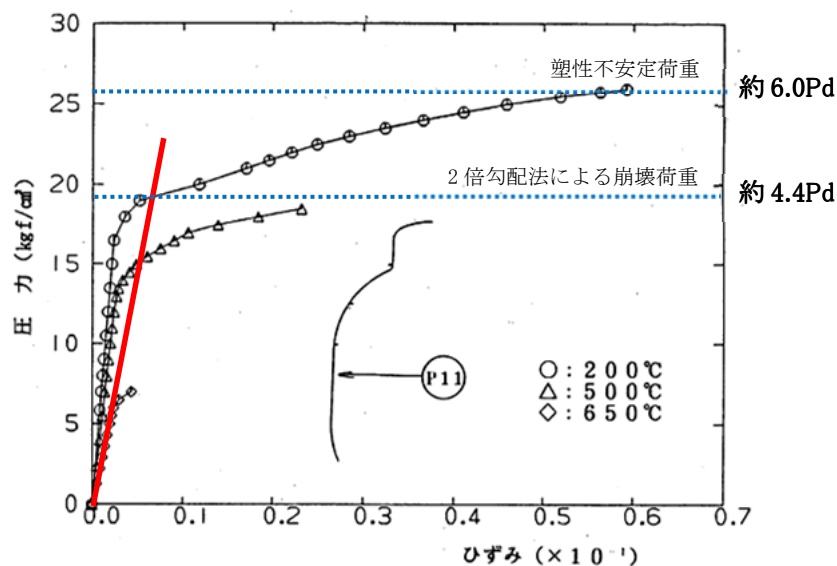
(3) 評価

a. 電共研での解析結果に基づく評価

電共研による代表プラントの全体構造解析結果から，応力値が最大となる評価点P11（円筒部中心部）の200℃における許容圧力は，約4.4Pd（約19kgf/cm²）～約6.0Pd（約26kgf/cm²）と得られている。（添付2.1-2）

電共研の解析結果は，女川原子力発電所2号炉と代表プラントの格納容器の径と板厚の比がほぼ同等であること，主要部材の材料が同じであることから，女川原子力発電所2号炉へ適用可能である。（添付2.1-3）

ひずみと圧力の関係を第2.1-2図に示す。



第2.1-2図 ひずみと圧力の関係

b. 設計・建設規格に基づく評価

(a) 胴部等及びベント管ベローズ

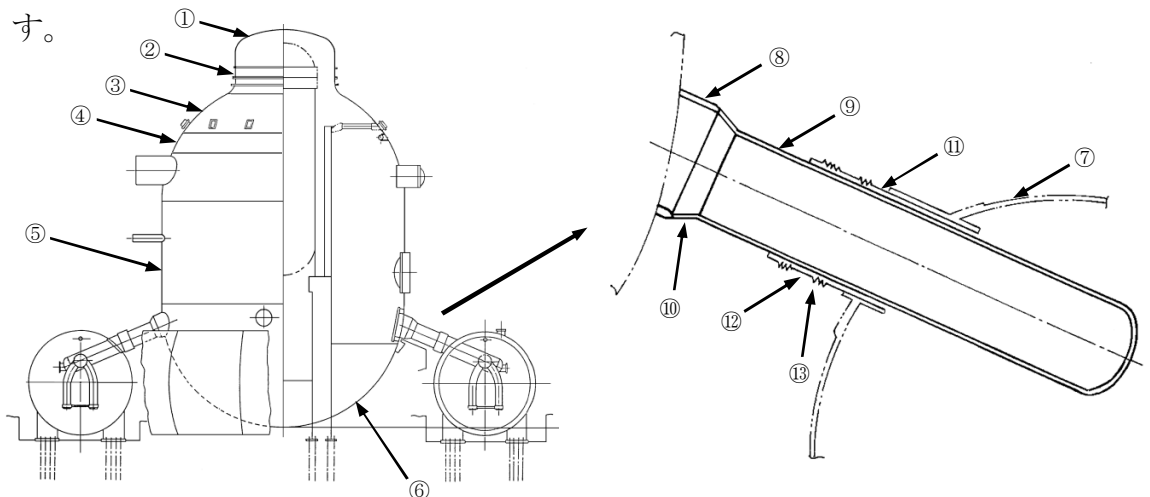
原子炉格納容器本体の胴部等の耐圧部材に対し、設計・建設規格の PVE-3230 (2) a 項, e 項, h 項, PVE-3321 及び PVE-3323 (1) 項を準用し、200°Cにおける許容圧力を算出し、算出した許容圧力が $2P_d$ 以上であることを確認する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ (S_u) の $2/3$ とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器 (クラス MC 容器) の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方である。

また、ベント管ベローズについては、設計・建設規格の PVE-3810 に準拠し、通常運転時及び試験状態における疲労累積係数 (設計繰返し回数と許容繰返し回数の比) に、200°C, $2P_d$ における疲労累積係数を加えた疲労累積係数の合計が 1 以下であることを確認する。

評価の結果、原子炉格納容器本体の胴部等の許容圧力は、最も裕度が低い部位で約 $2.6P_d$ であり、また、ベント管ベローズの疲労累積係数は 4.132×10^{-5} である。 (添付 2.1-4)

評価対象部位を第 2.1-3 図に、評価結果を第 2.1-2 表及び第 2.1-3 表に示す。



第 2.1-3 図 評価対象部位

第 2.1-2 表 評価結果（胴部等）

評価部位	材料	最高使用 圧力 (MPa)	200℃における 許容圧力 (MPa)	最高使用圧力に対する 許容圧力の比 (Pd)
①上鏡	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	1.225	2.86
②上部円筒部	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	1.458	
③球形部	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	1.675	
④球形部	SPV50 (SPV490 相当)	0.427	2.164	
⑤下部円筒部	SPV50 (SPV490 相当)	0.427	1.144	
⑥下鏡	SPV50 (SPV490 相当)	0.427	1.528	
⑦サプレッションチェンバ円筒胴	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	1.133	
⑧ベント管円筒部（厚さ <input type="text" value=""/> mm）	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	13.641	31.94
⑨ベント管円筒部（厚さ <input type="text" value=""/> mm）	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	2.446	
⑩ベント管円すい部	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	3.567	8.35
⑪ベント管伸縮継手円筒部（厚さ <input type="text" value=""/> mm）	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	4.331	10.14
⑫ベント管伸縮継手円筒部（厚さ <input type="text" value=""/> mm）	SGV49 (SGV480 相当)	0.427	2.793	6.54

第 2.1-3 表 評価結果（ベント管ベローズ）

評価部位	運転状態 I 及び II の 疲労累積係数	試験状態の 疲労累積係数	200℃, 2Pd の 疲労累積係数	疲労累積係数の 合計
⑬ベント管ベローズ				

(b) ドライウェル基部

ドライウェル基部は、コンクリート部で変形が拘束されることにより応力が発生する。既工認で評価した応力を用いて 200℃, 2Pd における発生応力を算出し、算出した発生応力が許容応力以下であることを確認する。許容応力は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器（クラ

ス MC 容器) の許容応力を使用する。

評価の結果、ドライウェル基部に発生する応力は、許容応力以下である。

(添付 2.1-5)

評価結果を第 2.1-4 表に示す。

第 2.1-4 表 評価結果 (ドライウェル基部)

応力評価点	一次+二次応力 (MPa)	
	応力振幅	許容応力
ドライウェル基部	<input type="text"/>	501

(4) 評価結果

原子炉格納容器本体の 200°Cにおける許容圧力は、電共研での解析結果に基づく評価において約 4.4Pd 以上、設計・建設規格に基づく評価において約 2.6Pd 以上である。また、200°C, 2Pd を考慮したベント管ベローズの疲労累積係数の合計は 1 以下であり、200°C, 2Pd においてドライウェル基部に発生する応力は許容応力以下である。

女川原子力発電所 2 号炉の原子炉格納容器本体は、200°C, 2Pd において耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

原子炉格納容器本体の評価部位と評価方法

原子炉格納容器バウンダリとなる耐圧部材に対し、既工認と同様の評価式である設計・建設規格に示される式を用いた評価及び電共研の原子炉格納容器全体構造解析結果を用いたドライウエルの評価により、原子炉格納容器バウンダリの全体評価を行った。

原子炉格納容器本体の評価部位と評価方法一覧を第 2.1-1-1 表に、設計・建設規格の式に基づく評価部位を第 2.1-1-1 図に示す。

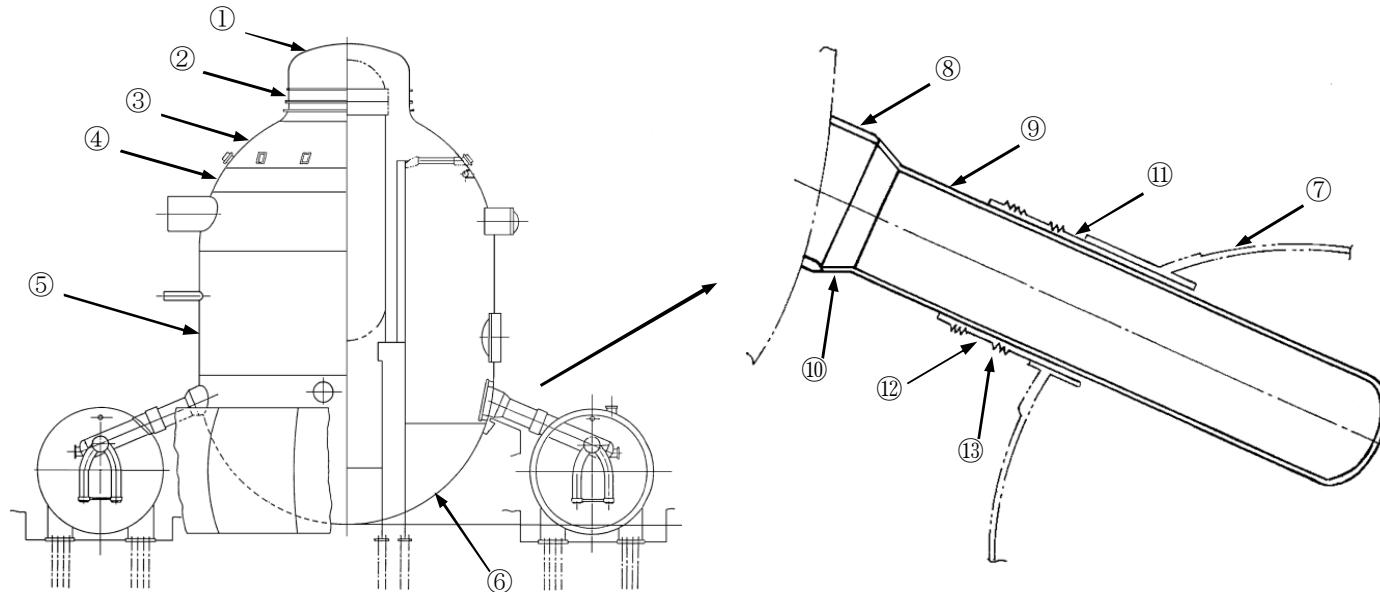
第 2.1-1-1 表 原子炉格納容器本体の評価部位と評価方法一覧

評価部位	材料	評価方法		備考	
		設計・建設規格の式に基づく評価*	電共研に基づく評価		
ドライウエル	上鏡	鏡板	SGV49 (SGV480 相当)	①	全体構造解析による評価
	上部円筒部	円筒胴	SGV49 (SGV480 相当)	②	全体構造解析による評価
	球形部	球形胴	SGV49 (SGV480 相当)	③	全体構造解析による評価
			SPV50 (SPV500 相当)	④	全体構造解析による評価
	下部円筒部	円筒胴	SPV50 (SPV490 相当)	⑤	全体構造解析による評価
	下鏡	鏡板	SPV50 (SPV490 相当)	⑥	全体構造解析による評価
サブプレッションチェンバ	円筒胴	SGV49 (SGV480 相当)	⑦	—	

* 丸囲み数字：評価部位

評価部位	分類	材料	評価方法		備考
			設計・建設規格の式に基づく評価*	電共研に基づく評価	
ベント管	円筒部 (厚さ□mm)	SGV49 (SGV480 相当)	⑧	—	
	円筒部 (厚さ□mm)	SGV49 (SGV480 相当)	⑨	—	
	円すい部	SGV49 (SGV480 相当)	⑩	—	
ベント管伸縮継手	円筒部 (厚さ□mm)	SGV49 (SGV480 相当)	⑪	—	
	円筒部 (厚さ□mm)	SGV49 (SGV480 相当)	⑫	—	
ベント管ベローズ	伸縮継手	SUS316L	⑬	—	疲労評価

* 丸囲み数字：評価部位



第 2.1-1-1 図 設計・建設規格の式に基づく評価部位

代表プラントの Mark-I 改良型原子炉格納容器の全体構造解析

1. 解析の概要

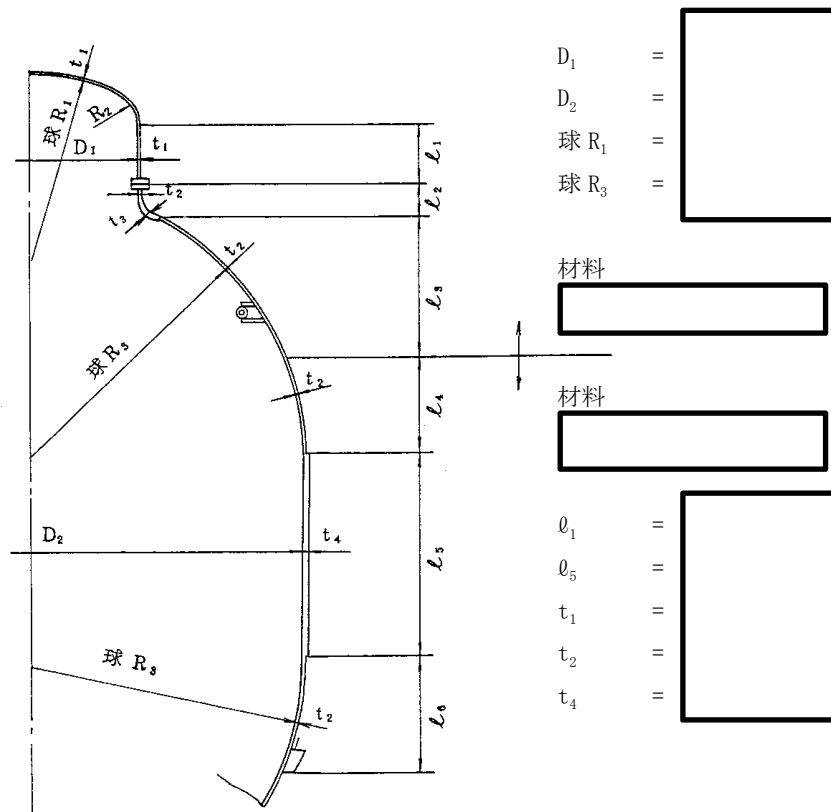
電共研において、軸対称の有限要素法モデルを用いて解析を実施し、代表プラントの Mark-I 改良型原子炉格納容器の全体構造の耐性評価を実施している。

電共研では、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析において収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理し、原子炉格納容器本体の許容圧力を評価している。

2. 解析条件

(1) 原子炉格納容器の形状、主要寸法

電共研で評価した代表プラントの Mark-I 改良型原子炉格納容器の形状及び主要寸法を第 2.1-2-1 図に示す。

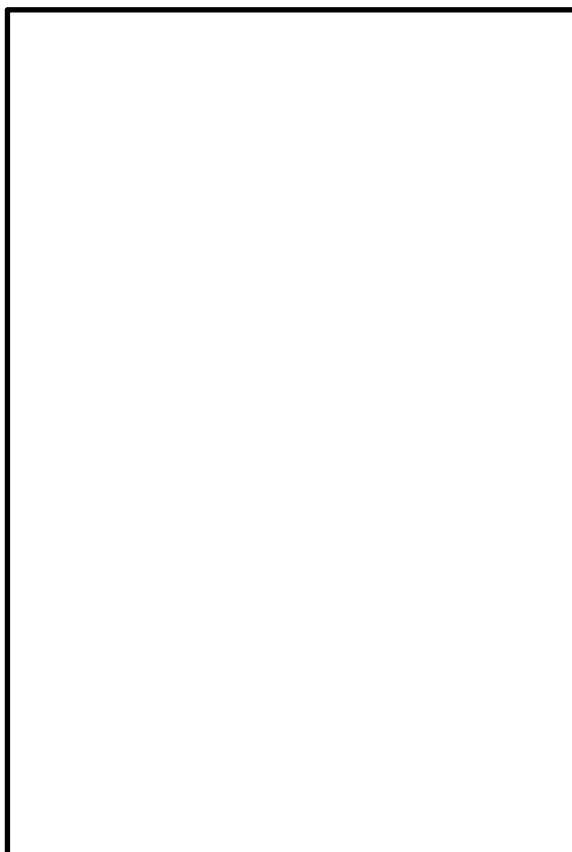


第 2.1-2-1 図 代表プラントの Mark-I 改良型原子炉格納容器の形状及び主要寸法

(2) 解析モデル

原子炉格納容器全体構造解析では，原子炉格納容器のシェル形状，板厚，主フランジ板厚及び補強リングの剛性を考慮してモデル化し，境界条件として，原子炉格納容器下部で固定としている。

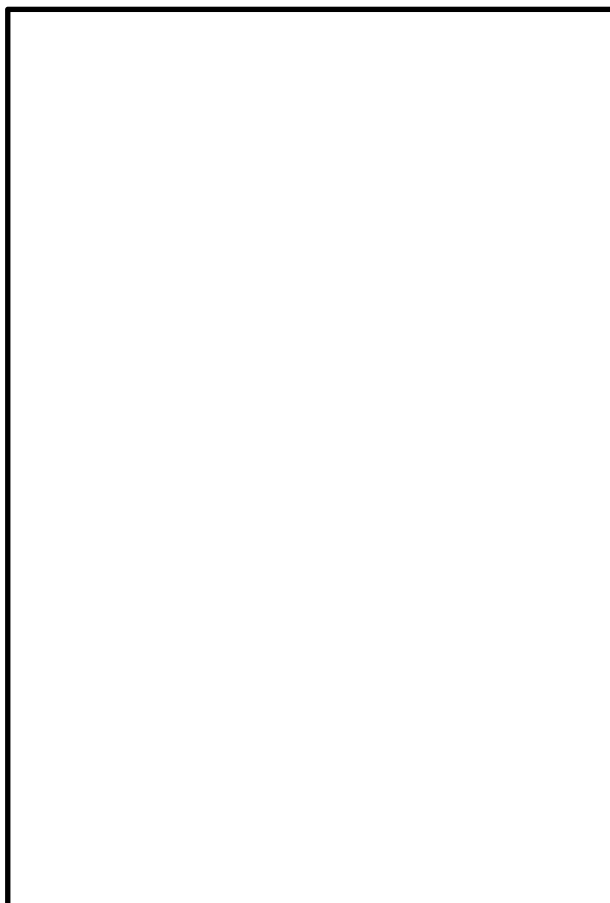
原子炉格納容器全体の解析モデルを第 2.1-2-2 図に示す。



第 2.1-2-2 図 原子炉格納容器全体の解析モデル

(3) 応力評価点

原子炉格納容器の応力評価点を第 2.1-2-3 図及び第 2.1-2-1 表に示す。



第 2.1-2-3 図 原子炉格納容器の応力評価点

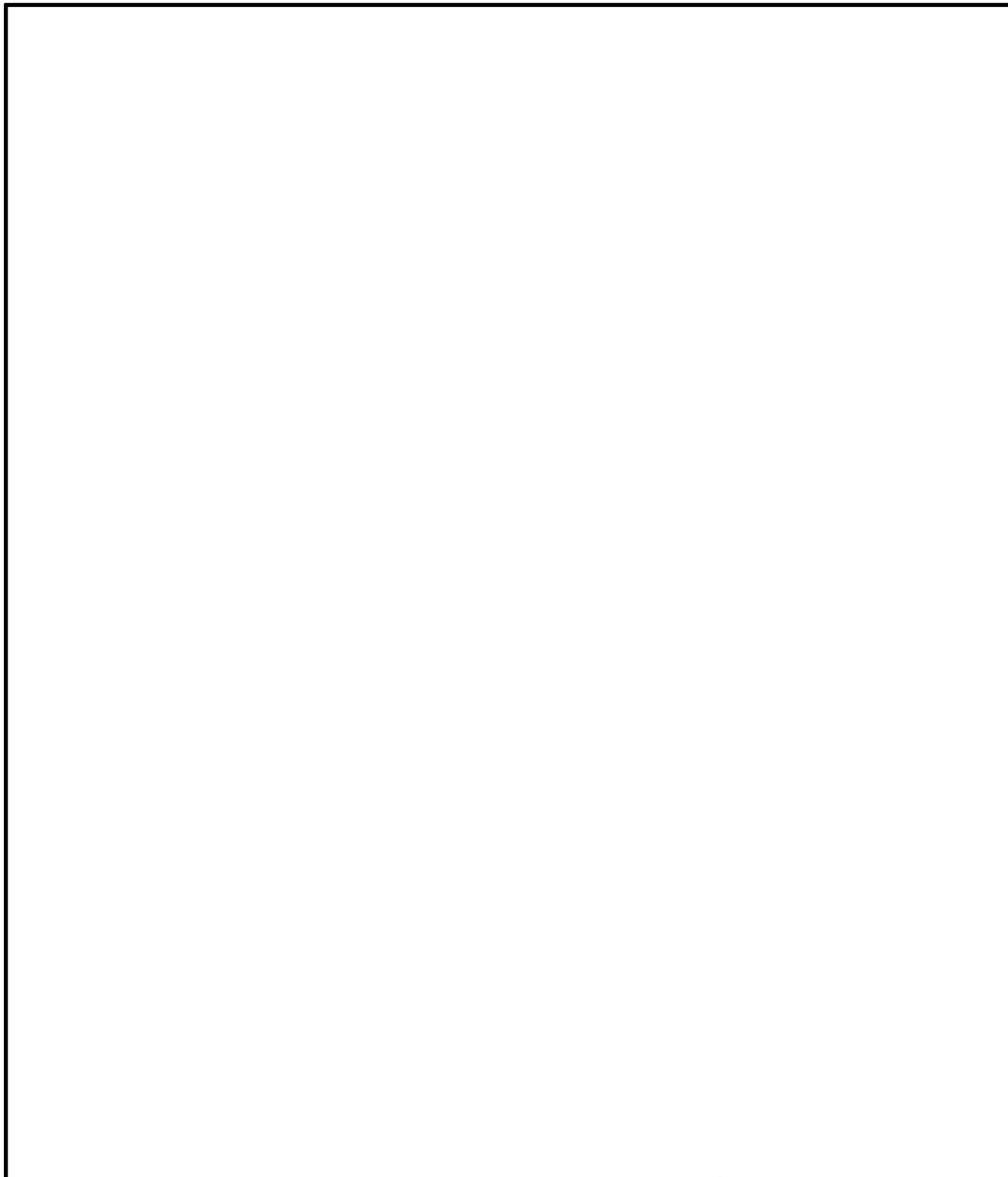
第 2.1-2-1 表 原子炉格納容器の応力評価点

番号	応力評価点
P 1	上鏡球形部
P 2	上鏡球形部と上鏡ナックル部の接合部
P 3	円筒部と上フランジの接合部
P 4	下フランジと円筒部の接合部
P 5	円筒部とナックル部の接合部
P 6	ナックル部と上部球形部の接合部
P 7	上部スプレイ管取付部
P 8	球殻材料変化部
P 9	下部スプレイ管取付部
P10	上部球殻部と円筒部の接合部
P11	円筒部中心部
P12	円筒部と下鏡の接合部
P13	サンドクッション部

3. 解析結果

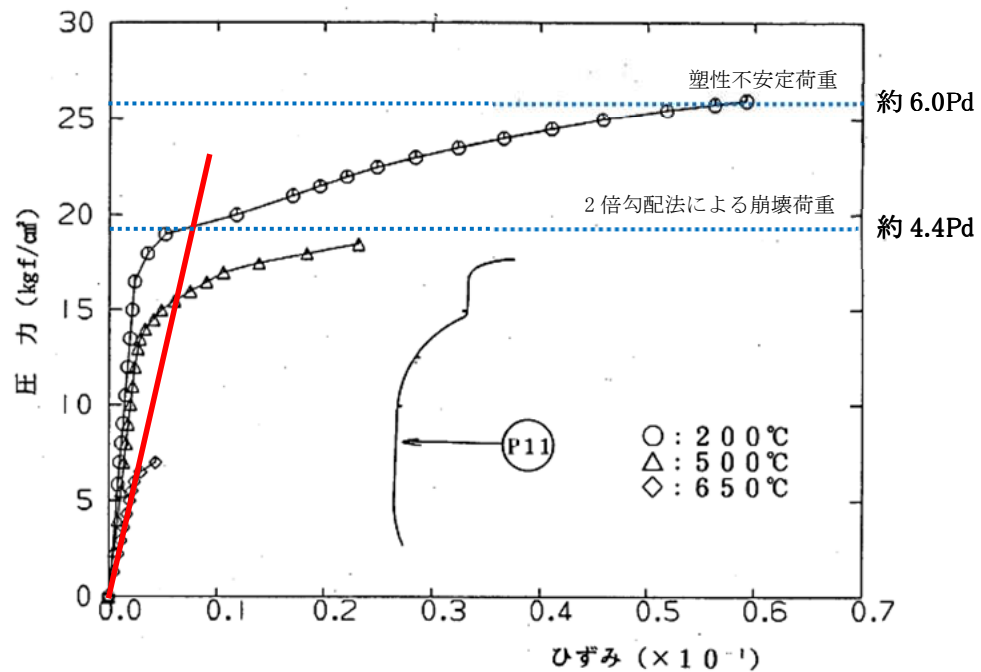
原子炉格納容器全体構造の解析結果（200℃）を第 2.1-2-2 表に示す。

第 2.1-2-2 表 原子炉格納容器全体構造の解析結果（200℃）



注) 1.記号 σ_t : 周方向膜応力 σ_a : 軸方向膜応力
2.引張り強さは、各温度における引張り試験結果による。

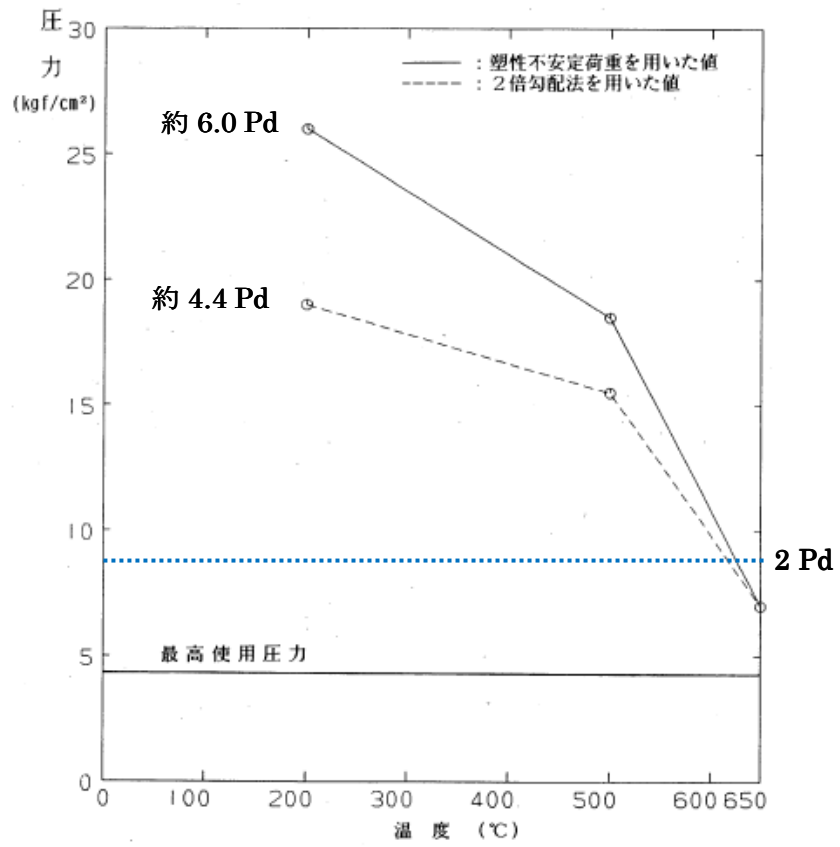
この解析結果において、2Pd 以上の圧力において応力値が最大となる評価点 P11 のひずみと圧力の関係を第 2.1-2-4 図に示す。



第2.1-2-4図 ひずみと圧力の関係

200°Cにおけるひずみと圧力のグラフから、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析結果が収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理した結果、200°Cにおける許容圧力は、約 4.4Pd（約 19kgf/cm²）～約 6.0Pd（約 26kgf/cm²）との結果が得られている。

原子炉格納容器の温度と許容圧力の関係を第 2.1-2-5 図に示す。



第 2.1-2-5 図 温度と許容圧力の関係

代表プラントの解析結果の適用性

原子炉格納容器本体の発生応力は、圧力と径に比例し、板厚に反比例の関係 ($\sigma = P \times R / t$, σ : 発生応力, P : 圧力, R : 径, t : 板厚) にある。

電共研による代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉の径と板厚の比 (R / t) を比較した結果、女川原子力発電所 2 号炉の R / t は、代表プラントの約 0.95 倍 (約 347/約 364) ～約 1.01 倍 (約 317/約 314) である。

原子炉格納容器本体主要寸法比較を第 2.1-3-1 表に、原子炉格納容器胴の形状及び主要寸法を第 2.1-3-1 図に示す。

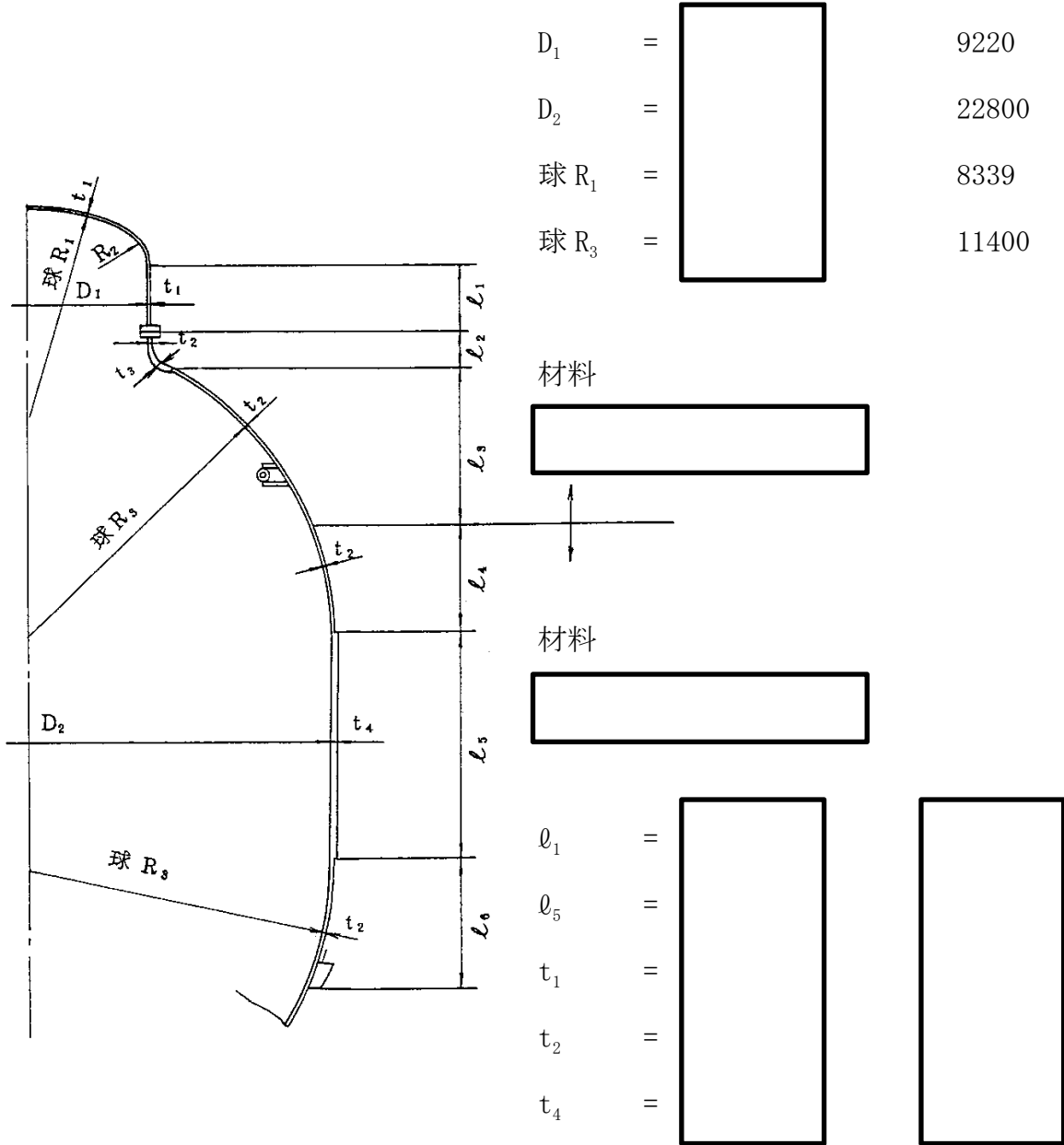
R / t の比がほぼ同等であること、また、主要部材の材料が同じであることから、電共研による代表プラントの解析結果を女川原子力発電所 2 号炉の評価に適用可能である。

第 2.1-3-1 表 原子炉格納容器本体主要寸法比較

項目			代表プラント	女川原子力発電所 2 号炉
最高使用圧力 (kPa)				427
上鏡	材料	-		SGV49 (SGV480 相当)
	板厚 (mm)	t_1		
	内半径 (mm)	球 R_1		8,339
	径 / 板厚	球 R_1 / t_1		約 347
上部円筒部	材料	-		SGV49 (SGV480 相当)
	板厚 (mm)	t_1		
	内径 (mm)	D_1		9,220
	径 / 板厚	$D_1 / 2 / t_1$		約 192
球形部	材料	-		SGV49 (SGV480 相当) 及び SPV50 (SPV490 相当)
	板厚 (mm)	t_2		
	内半径 (mm)	球 R_3		11,400
	径 / 板厚	球 R_3 / t_2		
下部円筒部	材料	-		SPV50 (SPV490 相当)
	板厚 (mm)	t_4		
	内径 (mm)	D_2		22,800
	径 / 板厚	$D_2 / 2 / t_4$		
下鏡	材料	-	SPV50 (SPV490 相当)	
	板厚 (mm)	t_2		
	内半径 (mm)	球 R_3	11,400	
	径 / 板厚	球 R_3 / t_2		

代表プラント

女川原子力発電所 2 号炉



第 2.1-3-1 図 原子炉格納容器胴の形状及び主要寸法

設計・建設規格に基づく評価

原子炉格納容器本体の必要板厚は、設計・建設規格 PVE-3230 (2) a 項, e 項, h 項, PVE-3321 及び PVE-3323 (1) 項の評価式により求めることができる。

これらの設計・建設規格の評価式に、女川原子力発電所 2 号炉の原子炉格納容器本体の板厚, 内径等の寸法と許容引張応力として 200°Cでの 2/3Su を与え, 許容圧力を算出する。

また、ベント管ベローズの疲労評価については、設計・建設規格の PVE-3810 に準拠して求めることができる。

① 上鏡 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3321 を準用

$$P_a = 2 S \eta t / (RW + 0.2t)$$

S (=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは、200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
R	鏡板の内半径 (mm)	8339
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	<input type="text"/>
W	さら形鏡板の形状による係数 (-)	1.32
P _a	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

② 上部円筒部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	9220
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

③ 球形部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)e 項を準用

$$Pa = 4 S \eta t / (Di + 0.4t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	22800
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

④ 球形部 : SPV50 (SPV490 相当)

PVE-3230(2)e 項を準用

$$Pa = 4 S \eta t / (Di + 0.4t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	363
Di	胴の内径 (mm)	22800
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

⑤ 下部円筒部 : SPV50 (SPV490 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	363
Di	胴の内径 (mm)	22800
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

⑥ 下鏡 : SPV50 (SPV490 相当)

PVE-3323 (1) を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (R + 0.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	363
R	鏡板の内半径 (mm)	11400
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

⑦ サプレッションチェンバ円筒胴 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230 (2) a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	9400
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

⑧ ベント管円筒部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	<input type="text"/>
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	13.641
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	31.94

⑨ ベント管円筒部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	1600
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	<input type="text"/>
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

⑩ ベント管円すい部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)h 項を準用

$$Pa = (2 S \eta t \times \cos \theta) / (Di + 1.2t \times \cos \theta)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
θ	円すいの頂角の 1/2 (°)	<input type="text"/>
Di	胴の内径 (mm)	<input type="text"/>
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	3.567
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	8.35

⑪ ベント管伸縮継手円筒部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	<input type="text"/>
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	<input type="text"/>
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	4.331
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	10.14

⑫ ベント管伸縮継手円筒部 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$P_a = 2 S \eta t / (D_i + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは, 200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
D _i	胴の内径 (mm)	<input type="text"/>
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	<input type="text"/>
P _a	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	2.793
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	6.54

⑬ ベント管ベローズ： SUS316L

PVE-3810 に準拠

$$N = (11031 / \sigma)^{3.5}$$

$$\sigma = 1.5 Et \delta / (n\sqrt{bh^3}) + Ph^2 / 2t^2 C \quad \text{【運転状態 I 及び II】}$$

$$\sigma = 1.5 Et \delta / (n\sqrt{bh^3}) + Ph / tC \quad \text{【試験状態及び重大事故時】}$$

t	継手部の板の厚さ (mm)	2
n	継手部の波数の 2 倍 (-)	
b	継手部の波のピッチの 1/2 (mm)	
h	継手部の波の高さ (mm)	
C	継手部の層数 (-)	

項目		運転状態 I 及び II	試験状態	200°C, 2Pd
P	圧力 (MPa)	0.0137	0.481	0.854
T	温度 (°C)	57	10	200
E	縦弾性係数 (MPa)	192440	195000	183000
δ	全伸縮量 (mm)	6.168	8.714	75.769
σ	伸縮継手の応力 (MPa)	57	86	587
N	許容繰返し回数	1.008×10^8	2.390×10^7	2.877×10^4
Nr	繰返し回数			
Nr/N	疲労累積係数			
$\Sigma Nr/N$	疲労累積係数の合計			

ドライウェル基部の応力評価

1. 評価の概要

ドライウェル基部は、コンクリート部により変形が拘束されることにより応力が発生する。既工認で評価した応力を用いて 200℃、2Pd における発生応力を算出し、算出した発生応力が許容応力以下であることを確認する。

2. 評価条件

(1) 評価条件

温度 : 200℃

圧力 : 2Pd (0.854MPa)

材料 : SPV50 (SPV490 相当)

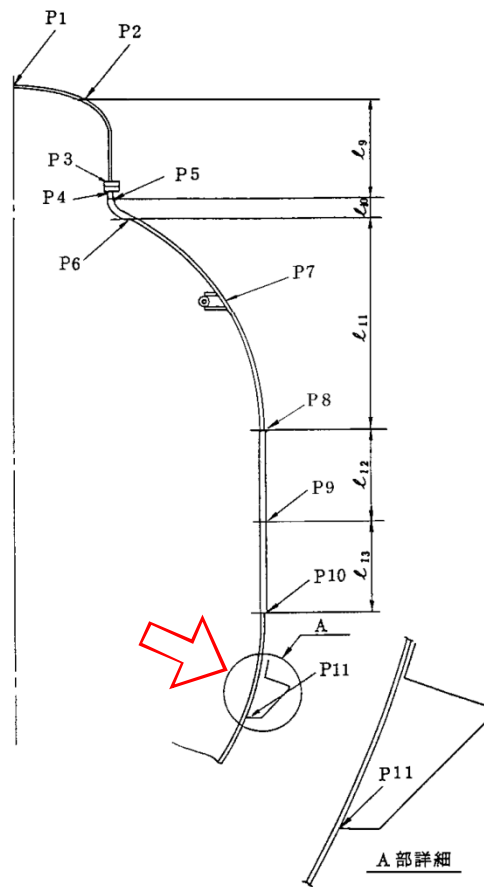
(2) 荷重の組合せ及び許容応力

ドライウェル基部に生じる応力は、既工認の応力を用いて算出する。この応力の算出において、既工認での評価条件と 200℃、2Pd の差異を考慮し、最高使用圧力により生じる応力については 2 倍し、また、熱荷重による応力は 4.05 倍*、鉛直荷重については、既工認と差異がないため 1 倍とし、これらを組合せて算出する。

許容応力は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器（クラス MC 容器）の許容応力を使用する。

応力評価点を第 2.1-5-1 図に、各荷重によりドライウェル基部に生じる応力を第 2.1-5-1 表に示す。

* : 既工認の熱荷重は、基準温度 10℃から通常運転時温度 57℃までの 47℃分の熱荷重であるため、今回の評価温度 200℃と基準温度 10℃までの 190℃分との比例倍とし 4.05 (190/47) を用いる。



第 2.1-5-1 図 応力評価点

第 2.1-5-1 表 各荷重によりドライウェル基部 (P11) に生じる応力 (200°C, 2Pd)

荷重名称	分類	一次+二次応力 (MPa)	
		内面	外面
最高使用圧力 (内圧)	σ_t	[Redacted]	[Redacted]
	σ_ℓ		
	$\tau_{t\ell}$		
鉛直荷重 (通常運転時)	σ_t		
	σ_ℓ		
	$\tau_{t\ell}$		
熱荷重 (通常運転時)	σ_t		
	σ_ℓ		
	$\tau_{t\ell}$		

3. 応力評価結果

評価の結果、ドライウェル基部 (P11) に発生する応力は、許容応力以下である。
評価結果を第 2.1-5-2 表に示す。

第 2.1-5-2 表 評価結果

応力評価点	一次+二次応力 (MPa)	
	応力振幅	許容応力
P11	<input type="text"/>	501

2.2 ドライウェル主フランジ

(1) 評価部位

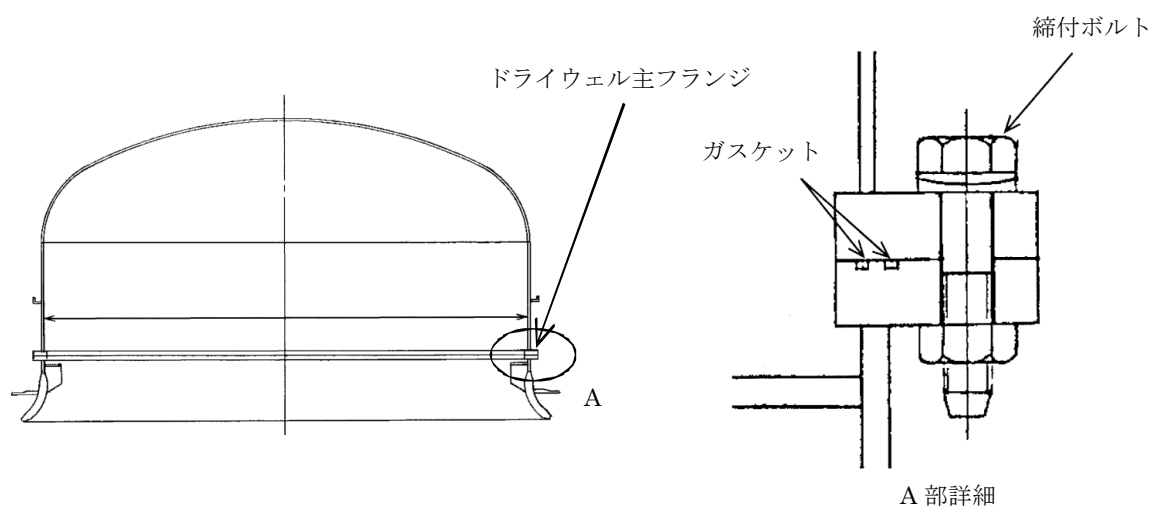
ドライウェル主フランジは、上鏡部のフランジと原子炉格納容器本体部のフランジを締付ボルトにより固定している。フランジ間には、シール溝が二重に配置されており、それぞれにガスケットを挟み込みシールしている。

ドライウェル主フランジの機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、評価条件200℃、2Pdにおいては、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

シール部は、内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい、フランジ開口の進展による締付ボルトの破損が想定される。また、シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し、シール能力が低下することが想定される。

このため、ドライウェル主フランジについて、フランジ及び締付ボルトの延性破壊、また、シール能力低下による漏えいを評価する。

ドライウェル主フランジの構造を第 2.2-1 図に示す。



第 2.2-1 図 ドライウェル主フランジの構造

(2) 評価方針

フランジ及び締付ボルトについて、電共研の解析結果を用いて、200℃における締付ボルトの機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、2Pd以上であることを確認する。

また、シール部について、実機をモデル化した解析によりドライウェル主フランジの開口量を求め、その開口量が、許容開口量以下であることを確認する。

ドライウェル主フランジの評価対象と評価方法を第 2.2-1 表に示す。

第 2.2-1 表 ドライウェル主フランジの評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
フランジ及び締付ボルト	延性破壊	・電共研（代表プラントのドライウェル主フランジ構造）の解析結果を用いて、許容圧力を評価
シール部 (フランジ、ガスケット)	開口、シール能力低下	・実機モデルの有限要素法によるドライウェル主フランジの 変形評価結果及び改良 EPDM 材の 圧縮永久ひずみ試験結果を踏まえ、シール機能を評価

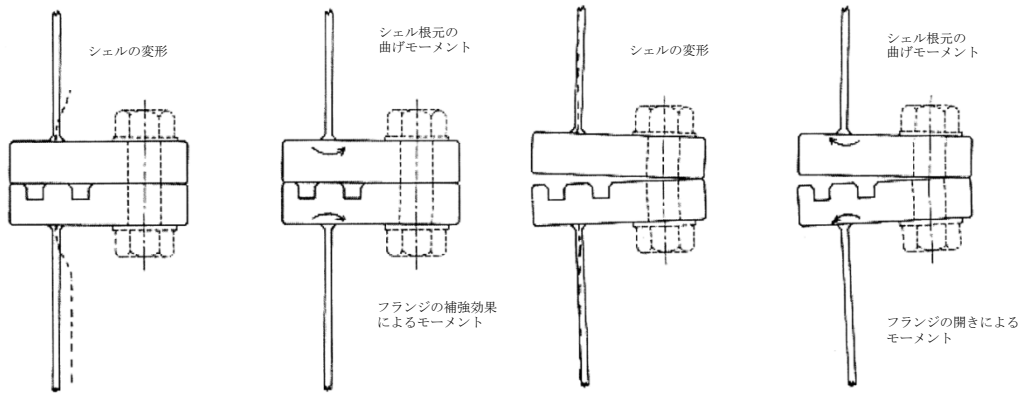
(3) 評価

a. 電共研の解析結果に基づくフランジ及び締付ボルトの評価

ドライウェル主フランジは、原子炉格納容器上鏡部に加わる内圧によりフランジ部に軸方向の力が加わり、これに対して締付ボルトによりフランジ外周部が支点となり、てこのようにフランジの開放を抑え込む。

内圧が高くなり締付ボルトに加わる力が大きくなると、締付ボルトが変形し、フランジ開口が大きくなる。

ドライウェル主フランジの開口メカニズムを第 2.2-2 図に示す。



第 2.2-2 図 ドライウェル主フランジの開口メカニズム

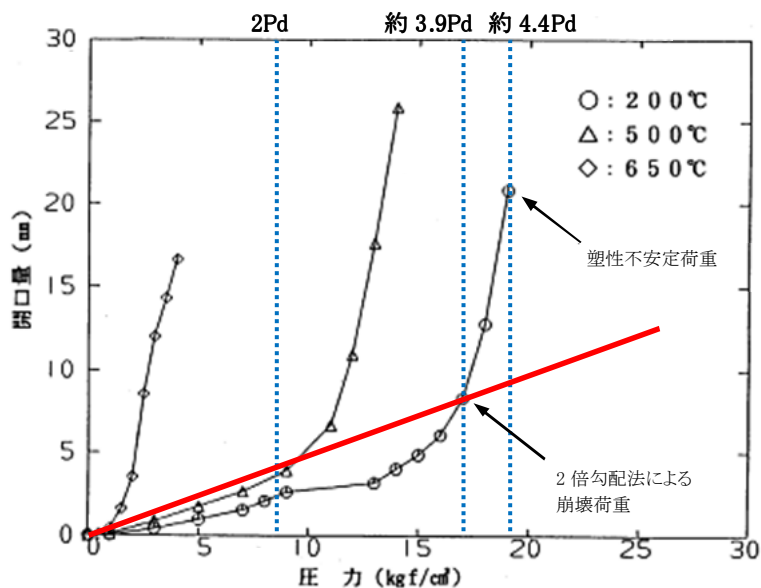
電共研において、代表プラントのドライウェル主フランジについて解析を行い耐性評価を実施している。その結果、フランジ部の評価においては、締付ボルトに生じる応力が大きく締付ボルトの破損が支配的であり、200℃における許容圧力は、約 3.9Pd (約 17kgf/cm²) ~ 約 4.4Pd (約 19kgf/cm²) と得られている。

(添付 2.2-1)

電共研の解析結果は、女川原子力発電所 2 号炉と代表プラントの主要部材の材料が同じであること、女川原子力発電所 2 号炉は代表プラントに比べ、フランジ部の径が小さく、締付ボルト径、ハブの厚さ及びフランジ厚さが大きいことから、女川原子力発電所 2 号炉の発生応力や開口量は小さくなると考えられ、女川原子力発電所 2 号炉へ適用可能である。

(添付 2.2-2)

圧力と開口量の関係（許容圧力）を第 2.2-3 図に示す。



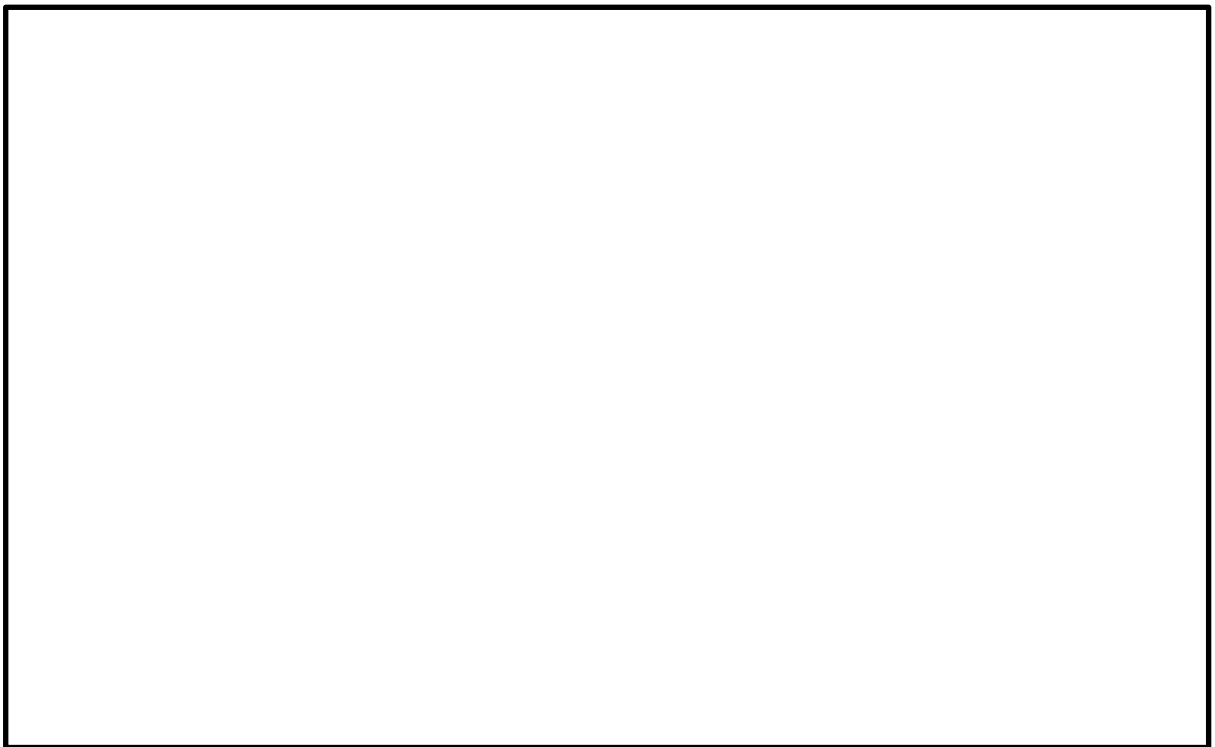
第 2.2-3 図 圧力と開口量の関係（許容圧力）

b. シール部の漏えい評価

実機をモデル化した解析によりドライウェル主フランジの開口量を求め、その開口量が、許容開口量以下であることを確認する。この際、シール材については、改良 EPDM 材に取り替える予定であるため、改良 EPDM 材のガスケットについて、重大事故時の環境に晒されることによる劣化（復元量の低下）を考慮したシール部の漏えいを評価する。また、この評価では、電共研において確認されている甲丸型ガスケットのセルフシール特性^{*1} は考慮せず、解析により求めた女川原子力発電所 2 号炉のフランジ開口量と許容開口量（改良 EPDM 材のガスケットの復元量）を比較評価する。 （添付 2.2-3）（添付 2.2-4）

ドライウェル主フランジの開口解析モデルを第 2.2-4 図に示す。

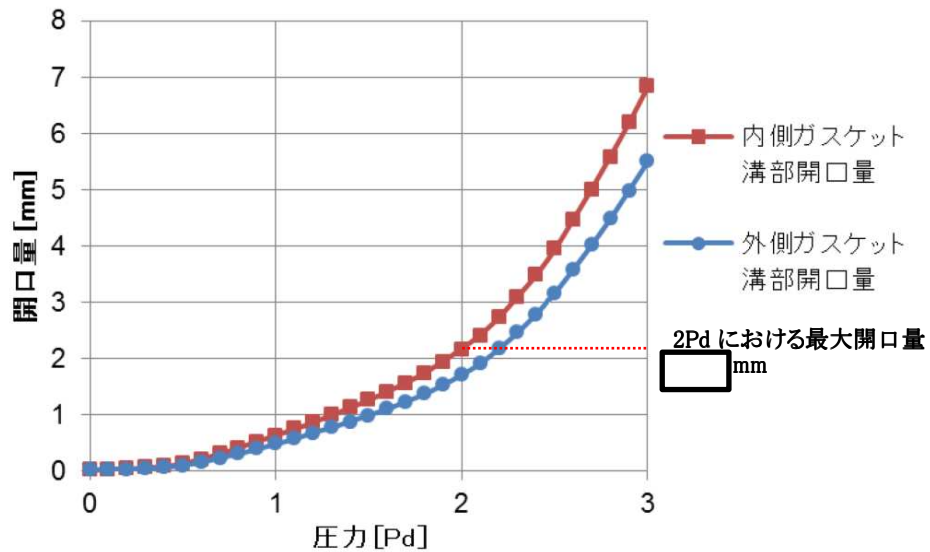
*1：甲丸型ガスケットでは、定格締め付け量の 1.8 倍～2 倍まで漏えいが生じないとの結果も得られている。



第2.2-4図 ドライウェル主フランジの開口解析モデル

(a) ドライウェル主フランジの開口量

解析結果から、200℃、2Pd におけるドライウェル主フランジの開口量は、約 mm である。圧力と開口量の関係を第 2.2-5 図に示す。



第 2.2-5 図 圧力と開口量の関係

(b) 許容開口量

改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 2.2-2 表に示す。

第 2.2-2 表 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

*1 : JIS K6262 に従い実施

*2 : 3 試験片の平均値 (% , % , %)

圧縮永久ひずみ試験結果から、改良 EPDM 材のガスケットを 200℃の飽和蒸気雰囲気に 168 時間晒した後の許容開口量（復元量）は、 mm（定格縮付け量 mm × (100% - %)）である。（添付 2.2-3）（添付 2.2-4）

(c) 漏えい評価

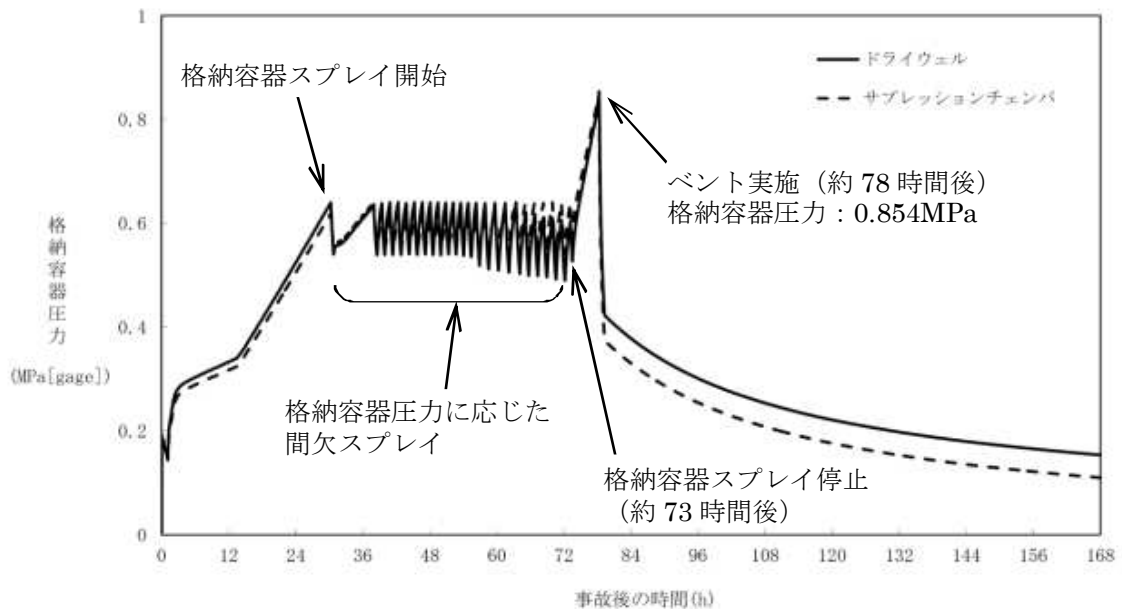
200°C, 2Pd における主フランジの開口量は約 mm であり, 168 時間 200°C 飽和蒸気に晒した後の改良 EPDM 材のガスケットの許容開口量 (復元量) mm 以下であることから, シール機能は維持され漏えいは生じないと考えられる。

(d) 事象進展を考慮した漏えい評価

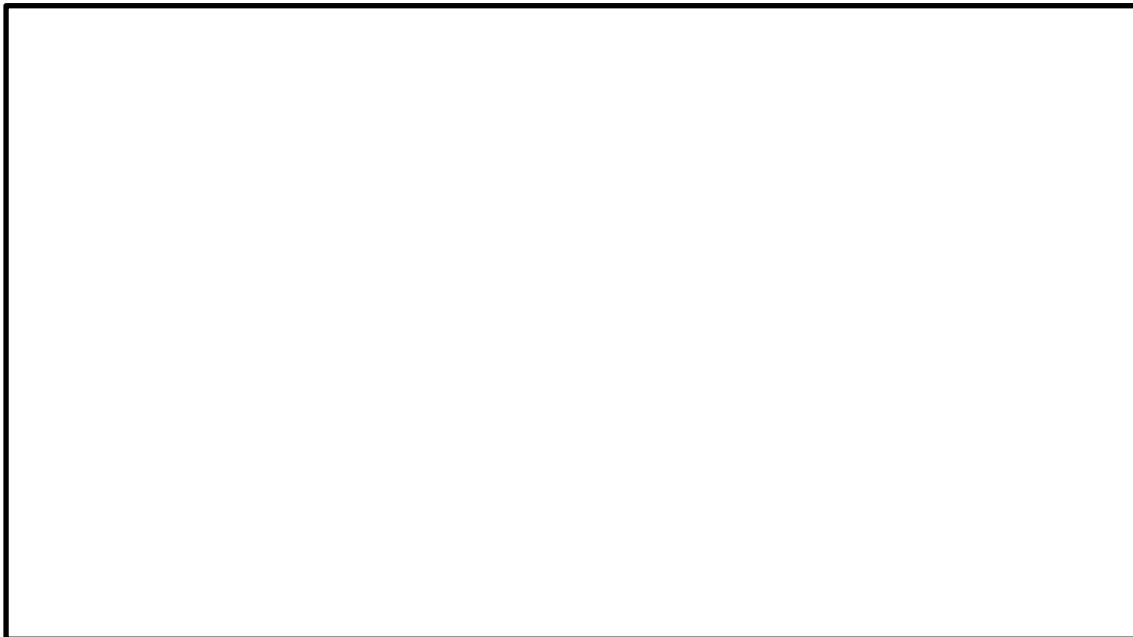
i. 事象進展を考慮した主フランジの開口量

原子炉格納容器内の雰囲気が高圧, 高圧で維持される時間が長い「LOCA 時注水機能喪失 (大破断 LOCA)」ケースについて, 事象進展 (原子炉格納容器内の圧力変化) に伴う, ドライウェル主フランジの開口量を解析により求めた。

原子炉格納容器内の圧力変化を第 2.2-6 図に, ドライウェル主フランジの開口量の変化を第 2.2-7 図に示す。



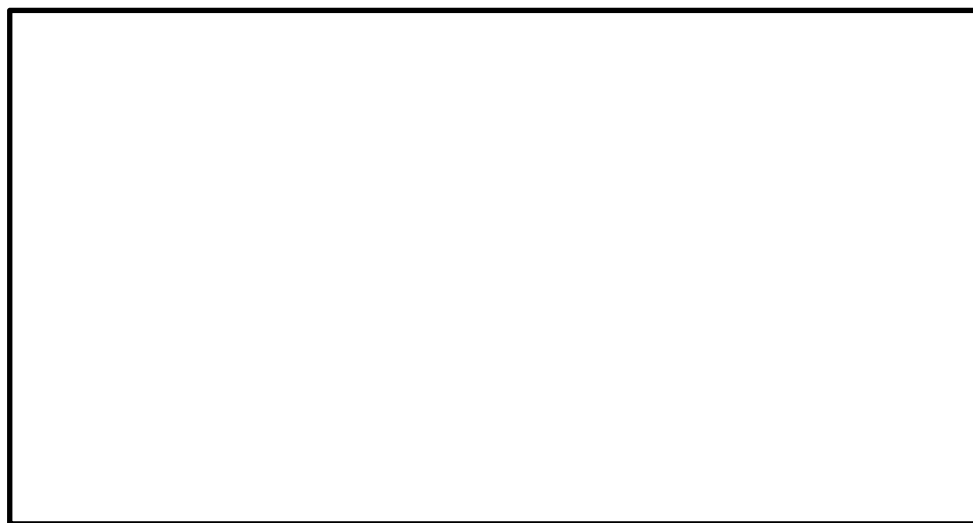
第 2.2-6 図 原子炉格納容器内の圧力変化
(LOCA 時注水機能喪失 (大破断 LOCA))



第2.2-7図 ドライウェル主フランジの開口量の変化
(LOCA時注水機能喪失(大破断LOCA))

ii. シール能力低下による漏えい評価

改良EPDM材の蒸気200℃での圧縮永久ひずみの時間変化を第2.2-8図に示す。



第2.2-8図 改良EPDM材の飽和蒸気200℃での圧縮永久ひずみの時間変化

第2.2-8図から、各時間帯における改良EPDM材の許容開口量（復元量）を求め、第2.2-7図に示すドライウェル主フランジの開口量の変化と比較し、ドライウェル主フランジの閉じ込め機能を評価する。

ドライウェル主フランジの開口量と許容開口量の時間変化を第2.2-9図に示す。



第2.2-9図 ドライウェル主フランジの開口量と許容開口量の時間変化

第2.2-9図より、事象発生後168時間において、ドライウェル主フランジの開口量が許容開口量を上回ることはなく、ドライウェル主フランジのシール機能が維持されることから漏えいは発生しないと考えられる。

また、シール部の漏えい評価は、ドライウェル主フランジの開口量と許容開口量との比較により実施しているが、原子炉格納容器内の圧力上昇に伴うフランジの開口速度にガスケットの復元速度が追い付かず、漏えいが生じる可能性がある。このため、フランジの開口速度とガスケットの復元速度を比較した結果、フランジの開口速度はガスケットの復元速度以下となり、原子炉格納容器内の圧力上昇に対してシール性能が確保できることを確認した。

(添付2.2-5)

上記の結果から、事象進展を考慮した漏えい評価においてもシール機能

は維持され漏えいは生じないと考えられる。

(4) 評価結果

ドライウェル主フランジの 200°Cにおける許容圧力は約 3.9Pd 以上である。
また、200°C, 2Pd におけるドライウェル主フランジの開口量は許容開口量以下である。

女川原子力発電所 2 号炉のドライウェル主フランジは、200°C, 2Pd において耐圧部材及びシール部の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。。

電共研におけるドライウェル主フランジの解析

1. 解析の概要

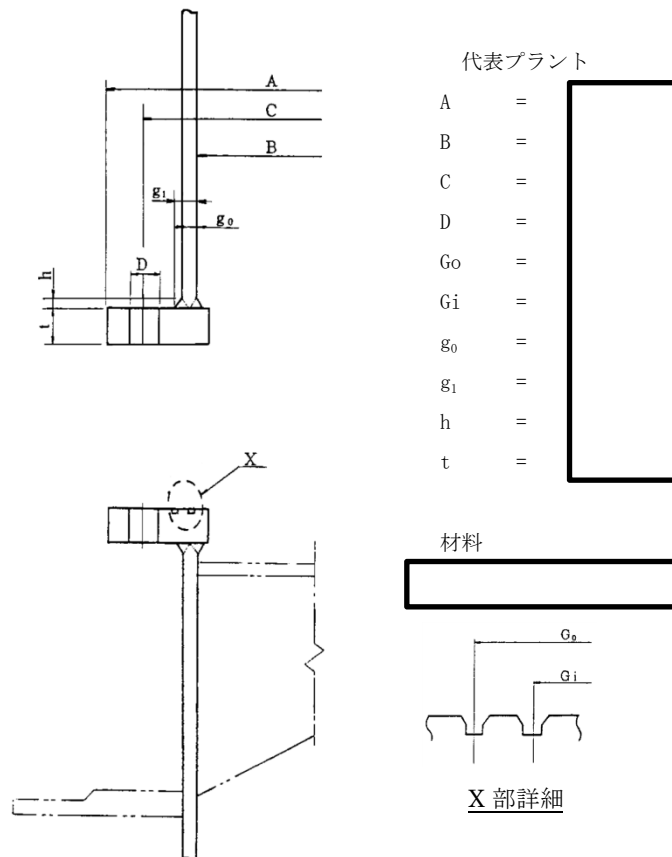
電共研において、軸対称の有限要素法モデルを用いて解析を実施し、代表プラントのドライウェル主フランジの耐性評価を実施している。

耐性評価では、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析において収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理し、ドライウェル主フランジの許容圧力を評価している。

2. 解析条件

(1) ドライウェル主フランジの形状及び主要寸法

電共研で評価した代表プラントのドライウェル主フランジの形状及び主要寸法を第 2.2-1-1 図に示す。

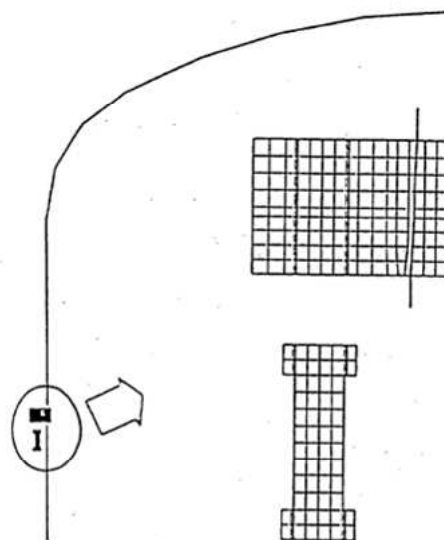


第 2.2-1-1 図 ドライウェル主フランジの形状及び主要寸法

(2) 解析モデル

ドライウエル主フランジの解析モデルは、原子炉格納容器のシェル形状、フランジを軸対称モデルにて、また、締付ボルトは、剛性等価な軸対称構造にてモデル化している。なお、フランジのシール材の材料物性はモデル化していない。

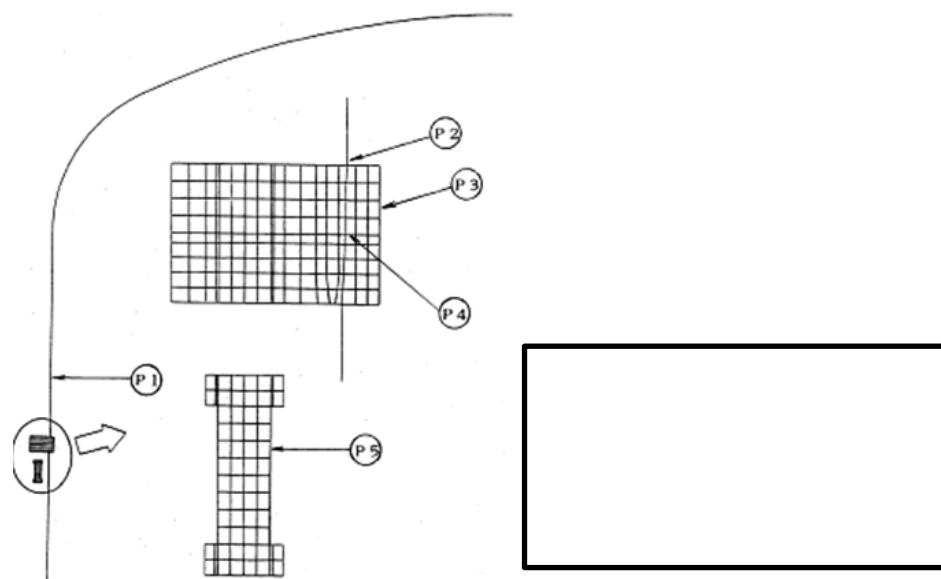
ドライウエル主フランジの解析モデルを第 2.2-1-2 図に示す。



第 2.2-1-2 図 ドライウエル主フランジの解析モデル

(3) 応力評価点

ドライウエル主フランジの応力評価点を第 2.2-1-3 図に示す。

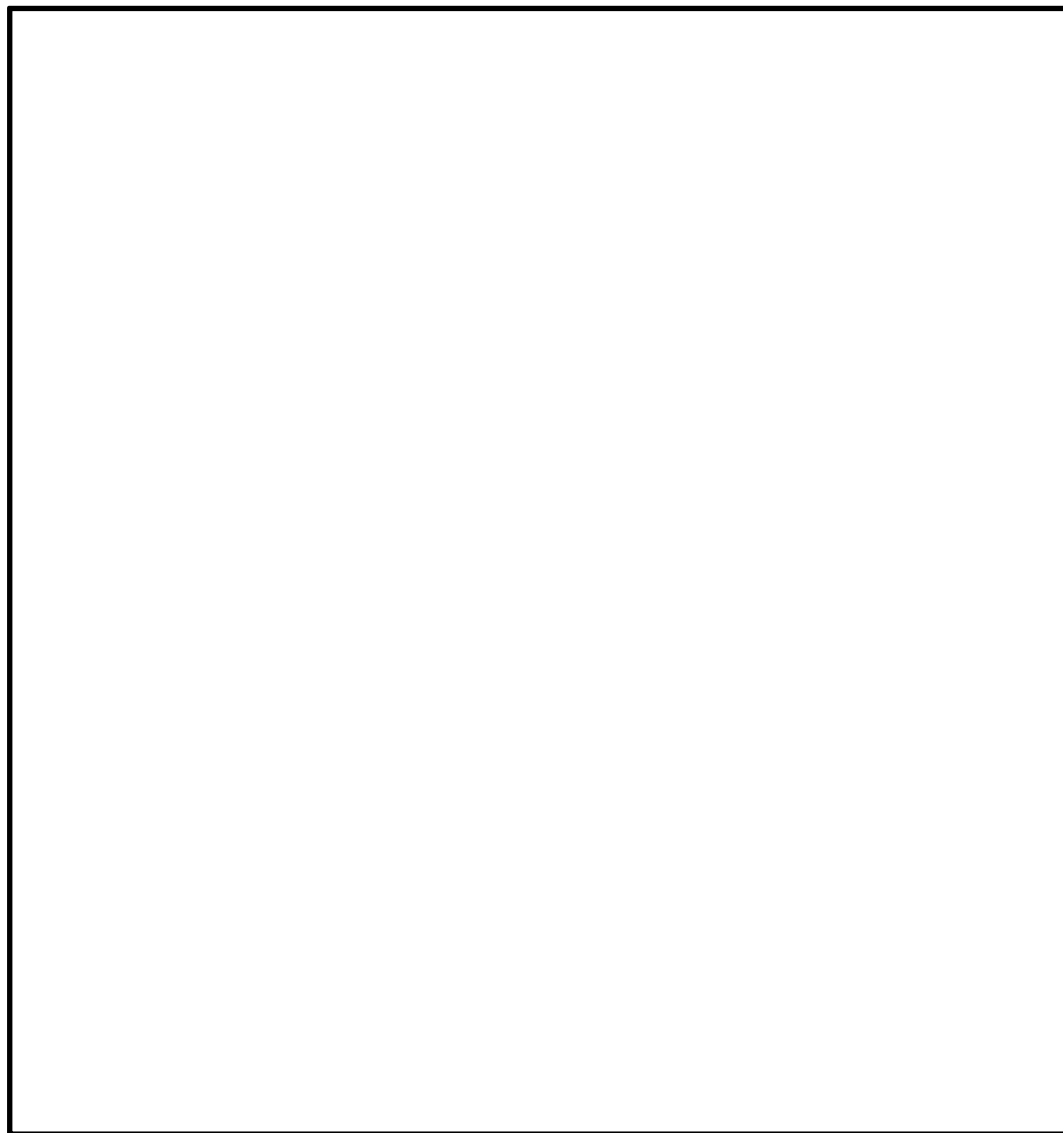


第 2.2-1-3 図 応力評価点

3. 解析結果

ドライウェル主フランジの解析結果（200℃）を第 2.2-1-1 表に示す。

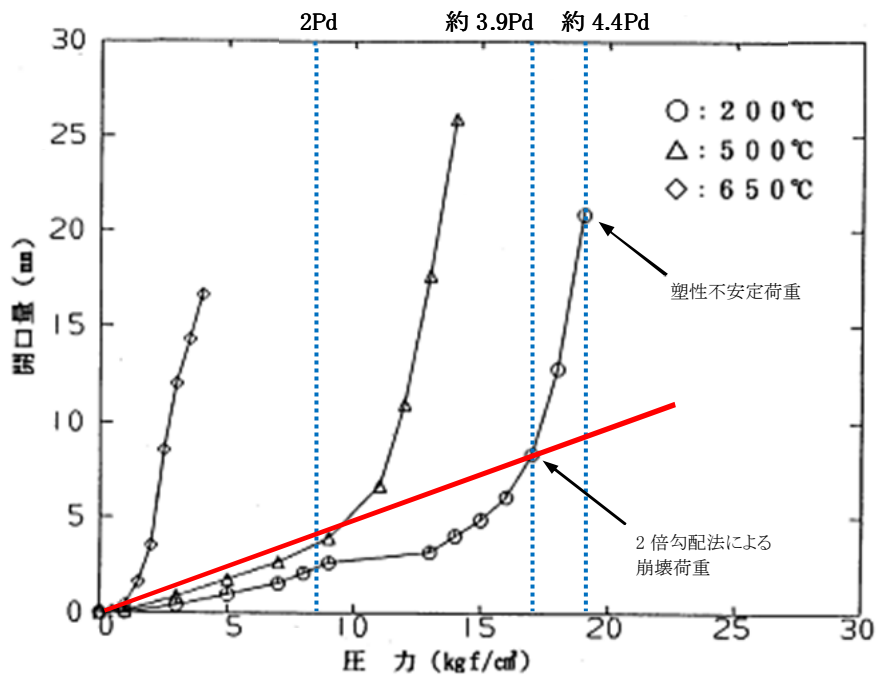
第 2.2-1-1 表 ドライウェル主フランジの解析結果（200℃）



注) 1.記号 σ_t : 周方向膜応力 σ_r : 軸方向膜応力
2.引張り強さは、各温度における引張り試験結果による。

この解析結果から、評価点 P5（ボルト）の応力値が最大であり、ドライウェル主フランジ部の許容圧力の評価において、締付ボルトの評価が支配的になると考えられる。

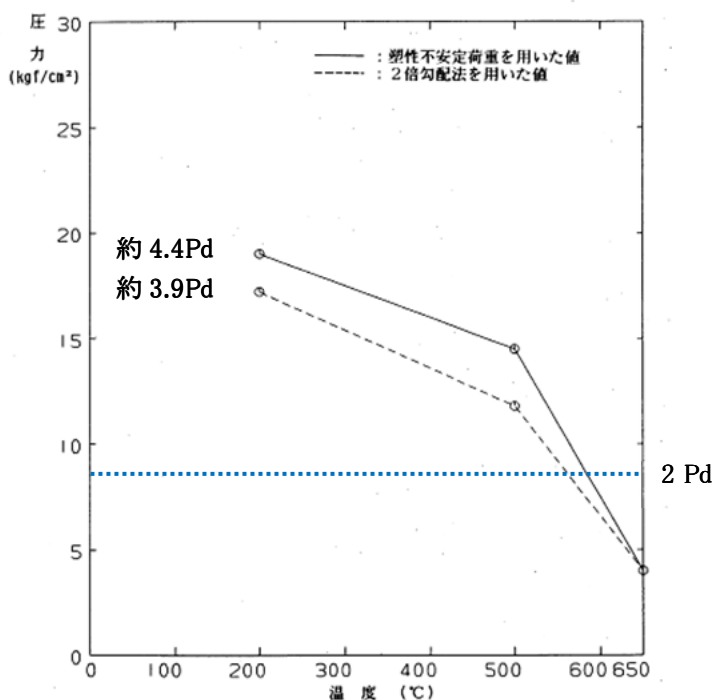
圧力と開口量の関係を示す第 2.2-1-4 図を示す。



第 2.2-1-4 図 圧力と開口量の関係

200°Cにおける圧力と開口量の関係から、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析結果が収束性を失う時の荷重(塑性不安定荷重)として整理した結果、200°Cにおける許容圧力は、約 3.9Pd(約 17kgf/cm²)～約 4.4Pd(約 19kgf/cm²)との結果が得られている。

ドライウェル主フランジの温度と許容圧力の関係を第 2.2-1-5 図に示す。



第 2.2-1-5 図 温度と許容圧力の関係

代表プラントの解析結果の適用性

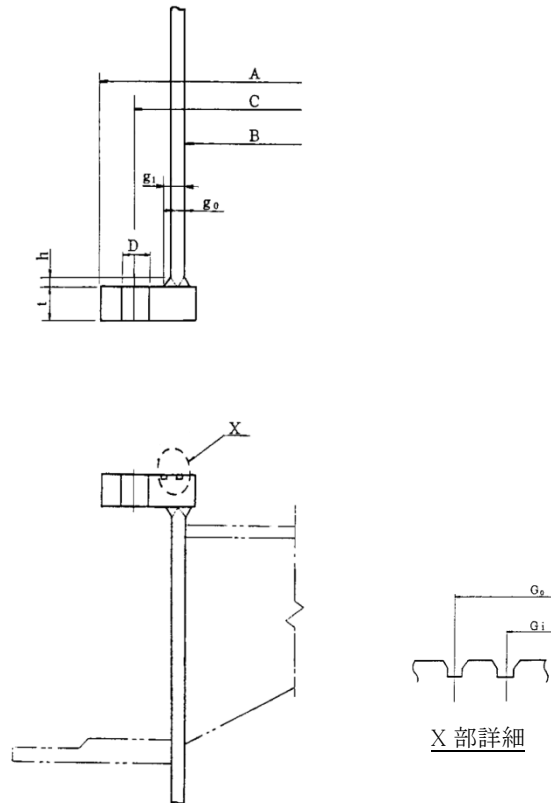
代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉のドライウェル主フランジは、主要部材の材料は同じであるが寸法が異なる。

ドライウェル主フランジの形状を第 2.2-2-1 図に、ドライウェル主フランジの主要寸法比較を第 2.2-2-1 表に示す。

代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉を比較すると、女川原子力発電所 2 号炉はフランジ及びガスケットに関する径が代表プラントより小さく、ドライウェル上鏡に作用する内圧による荷重が小さくなると考えられる。

また、女川原子力発電所 2 号炉の締付ボルト径、ハブの厚さ及びフランジ厚さが、代表プラントと比べ大きく、女川原子力発電所 2 号炉の発生応力や開口量は、代表プラントに比べ小さくなると考えられる。

以上から、代表プラントの解析結果を用いた女川原子力発電所 2 号炉の評価は、保守的な評価と考えられる。



第 2.2-2-1 図 ドライウェル主フランジの形状

第 2.2-2-1 表 ドライウェル主フランジの主要寸法比較

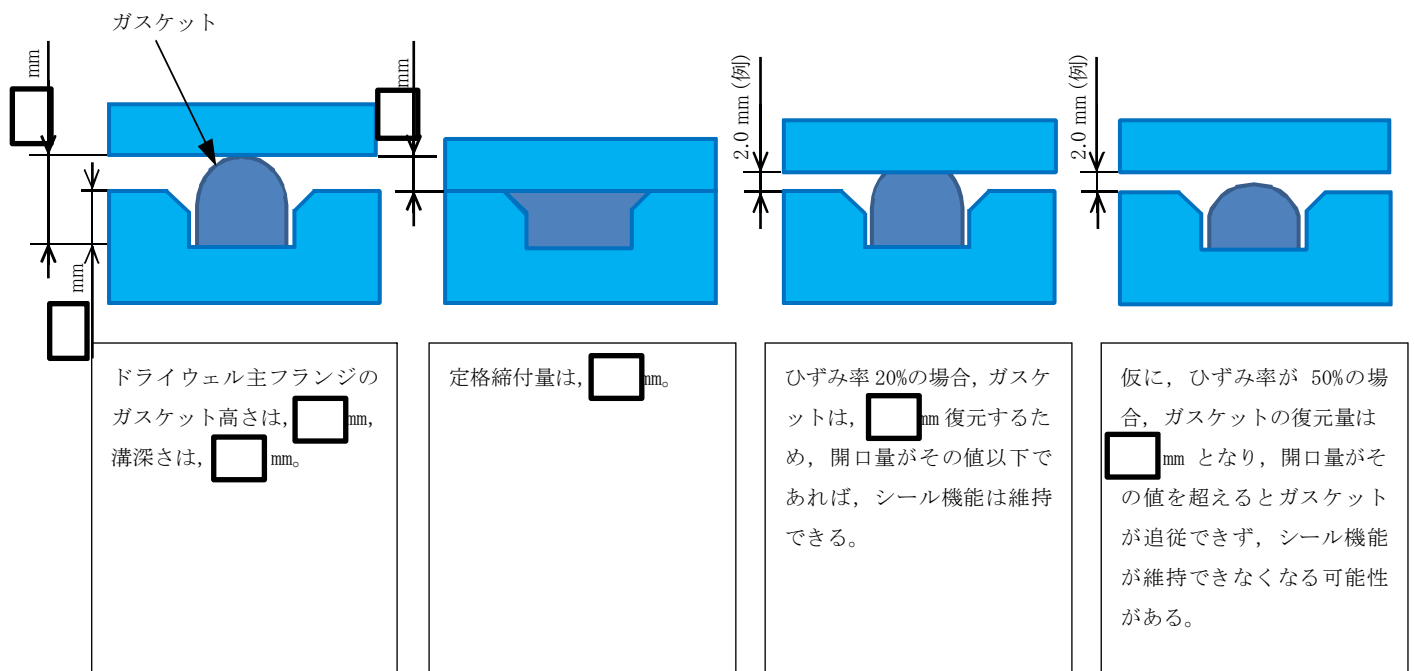
項目			代表プラント	女川原子力発電所 2 号炉
最高使用圧力 (kPa)				427
耐圧部材料				SGV49 (SGV480 相当)
フランジ部外径	A	mm		
フランジ部内径	B	mm		9,220
ボルトピッチ円直径	C	mm		
ボルト穴直径	D	mm		
外側ガスケット直径	Go	mm		
内側ガスケット直径	Gi	mm		
ハブの先端厚さ	g ₀	mm		
フランジ背面のハブの厚さ	g ₁	mm		
ハブの長さ	h	mm		
フランジ厚さ	t	mm		
ボルト呼び径	Db	-		
ボルト本数	-	本		

ガスケットの復元量

ドライウェル主フランジは、上鏡部のフランジと原子炉格納容器本体部のフランジ間にシール溝が二重に配置されており、それぞれガスケットを挟み込み締付ボルトで固定しシールしている。

ガスケットが劣化し、復元力が低下するとフランジの開口に追従できずシール機能が維持できなくなる可能性がある。

フランジの開口量とガスケットの復元量の関係を第 2.2-3-1 図に示す。



第 2.2-3-1 図 フランジの開口量とガスケットの復元量の関係

甲丸型フランジの締付量について

既往の電共研において、ドライウェル主フランジ等のフランジ形状を模擬した小型モデル試験による重大事故時環境条件に対するシール材の耐性評価を実施している。

1. 試験方法

予め定めた締付量で試験片（シリコンゴム）をフランジにセットし、昇温後温度を一定に保った状態で加圧媒体（蒸気）によって徐々に昇圧し、シール部からの漏えいを確認したときの圧力、温度を記録した。

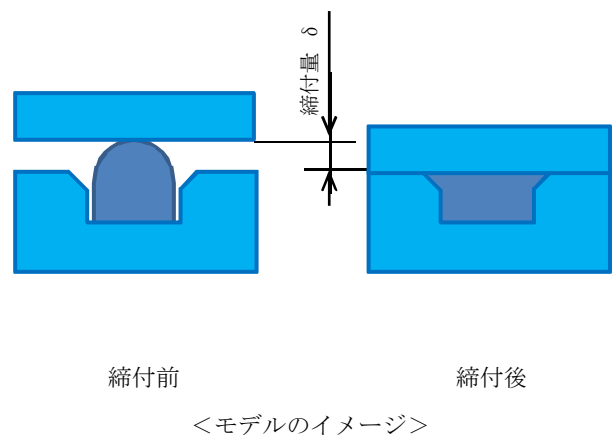
試験片に与える最大内圧は、約 MPa (kgf/cm²) とし、225℃、250℃、275℃、300℃、325℃の条件で試験を実施した。

2. シール材の小型モデル試験条件

シール材の小型モデル試験条件を第 2.2-4-1 表に示す。

第 2.2-4-1 表 シール材の小型モデル試験条件

温度	225℃～325℃
照射量	無, 有 (<input type="text"/> kGy)
加圧媒体	蒸気
シール構造	甲丸型
締付量*1	$\delta_1 =$ <input type="text"/> mm $\delta_2 =$ <input type="text"/> mm $\delta_3 =$ <input type="text"/> mm $\delta_4 =$ <input type="text"/> mm



*1：締付量は、常温で試験装置にセットする時にガスケットが押しつぶされる量を示す。

定格締付量は mm。

シール材高さと同深さの設計値をもとにスペーサーを用いて締付量を設定した。

3. 試験結果

照射の有無に関係なく、縮付量 δ_1 (mm) において、225°C以下では漏えいは発生しなかった。

以上から、200°C, 2Pd において、シール構造が甲丸型であるフランジにおいては、縮付量 mm までは漏えいが発生しない。

試験結果を第 2.2-4-2 表に示す。

第 2.2-4-2 表 試験結果

--

フランジ開口速度に対するガスケット復元速度の比較評価

シール部の開口評価は、ドライウェル主フランジの開口量と許容開口量との比較により実施しているが、原子炉格納容器内の圧力上昇に伴うフランジの開口速度にガスケットの復元速度が追い付かず、漏えいが生じる可能性がある。そこで、許容開口量の算出のベースとしているガスケットの圧縮永久ひずみ試験から得られたガスケット復元速度と有効性評価 (LOCA 時注水機能喪失 (大破断 LOCA)) における MAAP 解析結果から想定されるフランジの開口速度を比較して評価を実施した。

なお、評価は圧力によるフランジの開口量が厳しいドライウェル主フランジを代表として、圧力による開口量の影響が大きい 1Pd 以上の領域でのフランジ開口速度 (代表 3 点) で実施した。

1. ガスケット復元速度

圧縮永久ひずみ試験の結果から、高さ 12.5mm の試験片を規定時間圧縮し、解放 30 分後におけるひずみ率 % を加味した試験片高さ mm と圧縮解放直後の試験片高さ 9.375mm から平均復元速度を算出する。

$$\left(\text{} - 9.375 \right) \text{mm} / 30 \text{min} = \text{} \text{mm/min}$$

2. フランジ開口速度

第 2.2-5-1 図に示す 3 点で開口速度を算出する。なお、フランジの開口速度は、解析で得られた 1Pd (427kPa) から 2Pd (854kPa) までの平均速度で算出する。(第

2.2-5-2 図参照)

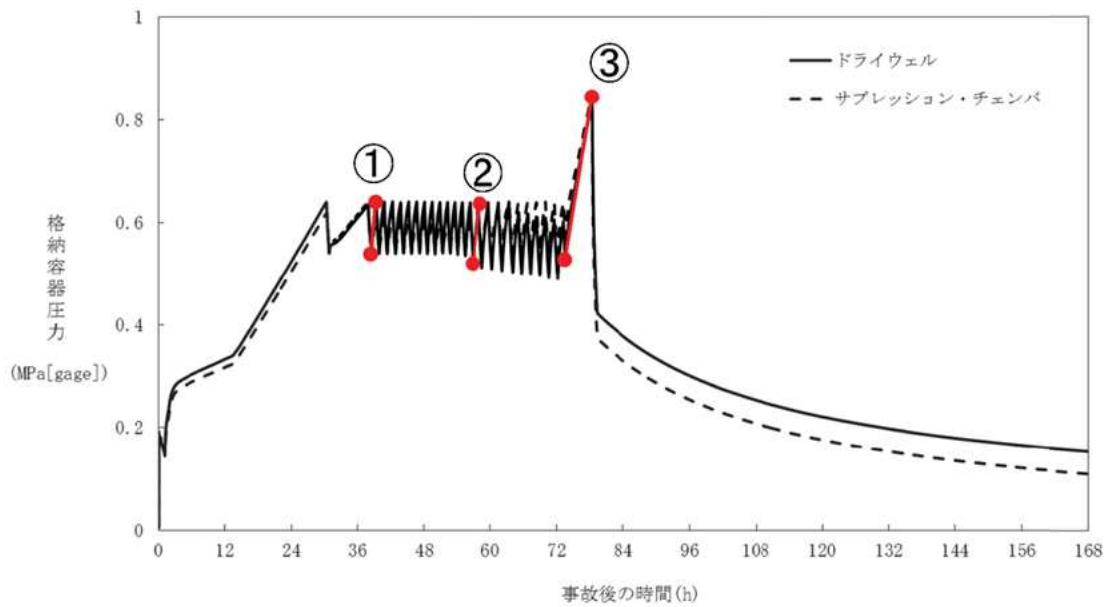
$$\text{①} 1.89 \text{ kPa/min} \times \text{} \text{mm} / 427 \text{ kPa} = \text{} \text{mm/min}$$

$$\text{②} 1.99 \text{ kPa/min} \times \text{} \text{mm} / 427 \text{ kPa} = \text{} \text{mm/min}$$

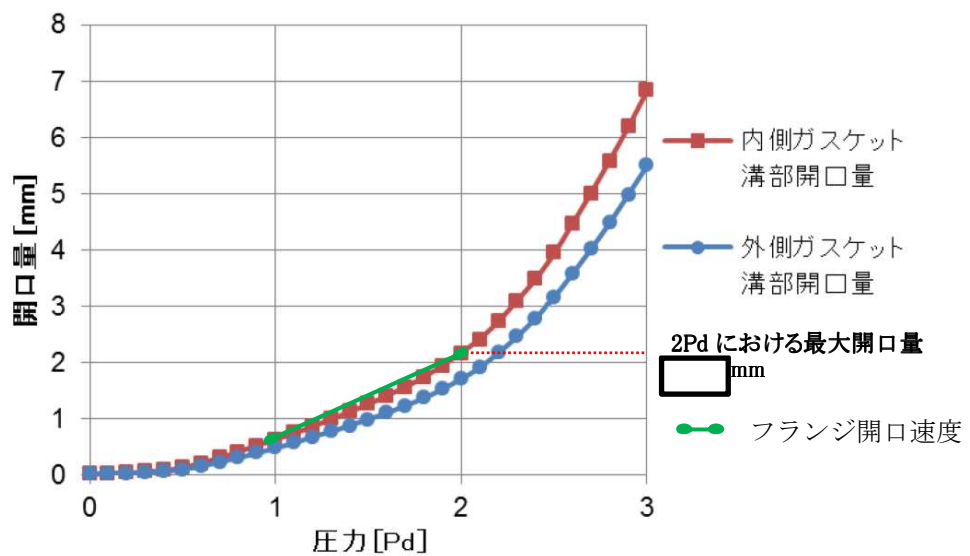
$$\text{③} 1.11 \text{ kPa/min} \times \text{} \text{mm} / 427 \text{ kPa} = \text{} \text{mm/min}$$

3. 評価結果

算出したフランジ開口速度はいずれもガスケット復元速度以下であり, 急激な圧力上昇時においてもシール機能は維持可能である。



第 2.2-5-1 図 原子炉格納容器内圧力の変化 (LOCA 時注水機能喪失 (大破断 LOCA))



第 2.2-5-2 図 ドライウエル主フランジ開口速度

2.3 機器搬出入用ハッチ

(1) 評価部位

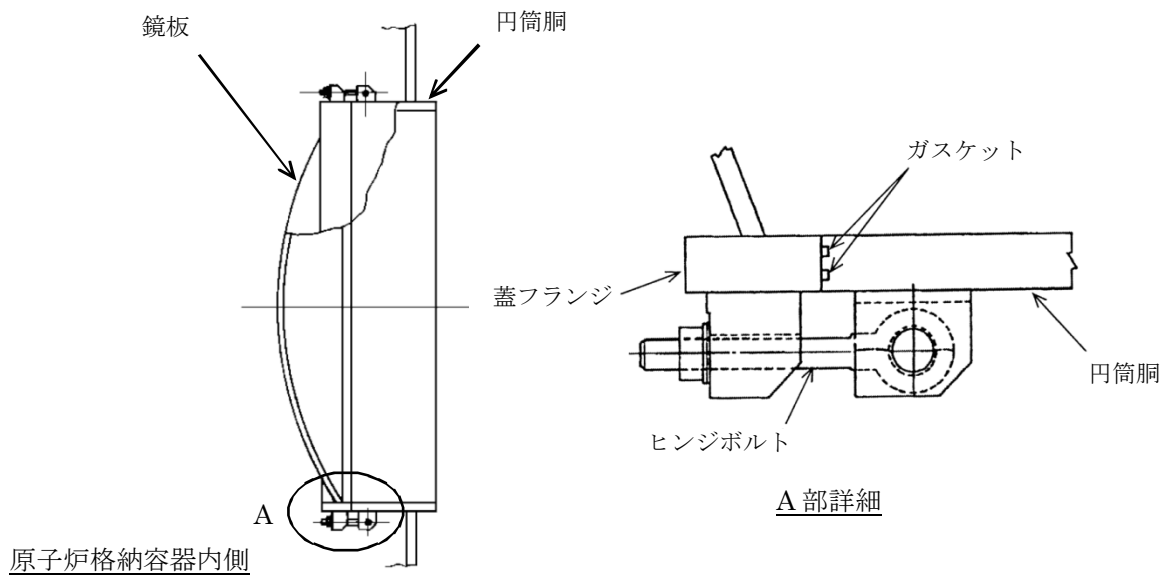
機器搬出入用ハッチは、鏡板、蓋フランジ、フランジ付の円筒胴及びヒンジボルトからなり、原子炉格納容器の貫通部にフランジ付の円筒胴を溶接固定し、フランジ間にはシール溝が二重に配置されており、それぞれにガスケットを挟み込み、ヒンジボルトで締め付けシールする構造である。

機器搬出入用ハッチの機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、評価条件 200℃、2Pd においては、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないことから、脆性破壊、疲労破壊は評価対象外と考えることができる。また、シール部は、原子炉格納容器内の圧力により鏡板を機器搬出入用ハッチ円筒胴に押付ける構造であり、内圧により鏡板を開く荷重が作用しないことから、ヒンジボルトの延性破壊は、評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pd における機器搬出入用ハッチの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、板厚に対し球殻の半径が大きい鏡板の座屈、原子炉格納容器本体の変形に伴う円筒胴の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいが想定される。

このため、機器搬出入用ハッチについて、円筒胴取付部及び円筒胴の延性破壊、鏡板の座屈、円筒胴の変形に伴うガスケットのシール能力低下による漏えいを評価する。

機器搬出入用ハッチの構造を第 2.3-1 図に示す。



第 2.3-1 図 機器搬出入用ハッチの構造

(2) 評価方針

電共研の解析結果，設計・建設規格を準用した評価及び機械工学便覧の座屈評価式を用いて，200℃における円筒胴，鏡板の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し，2Pd 以上であることを確認する。

また，シール部について，有限要素法によりフランジ部の変形量を評価し，許容変形量以下であることを確認する。

機器搬出入用ハッチの評価対象と評価方法を第 2.3-1 表に示す。

第 2.3-1 表 機器搬出入用ハッチの評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
円筒胴取付部	延性破壊	・電共研（代表プラントのペネトレーション構造）の解析結果を用いて，許容圧力を評価
円筒胴	延性破壊	・設計・建設規格（PVE-3230）を準用し，200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価
鏡板	座屈	・機械工学便覧の座屈評価式を準用し，許容圧力（座屈圧力）を評価
シール部 （フランジ，ガスケット）	変形，シール 能力低下	・実機モデルの有限要素法によるフランジ部の変形評価結果及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を踏まえ，シール機能を評価

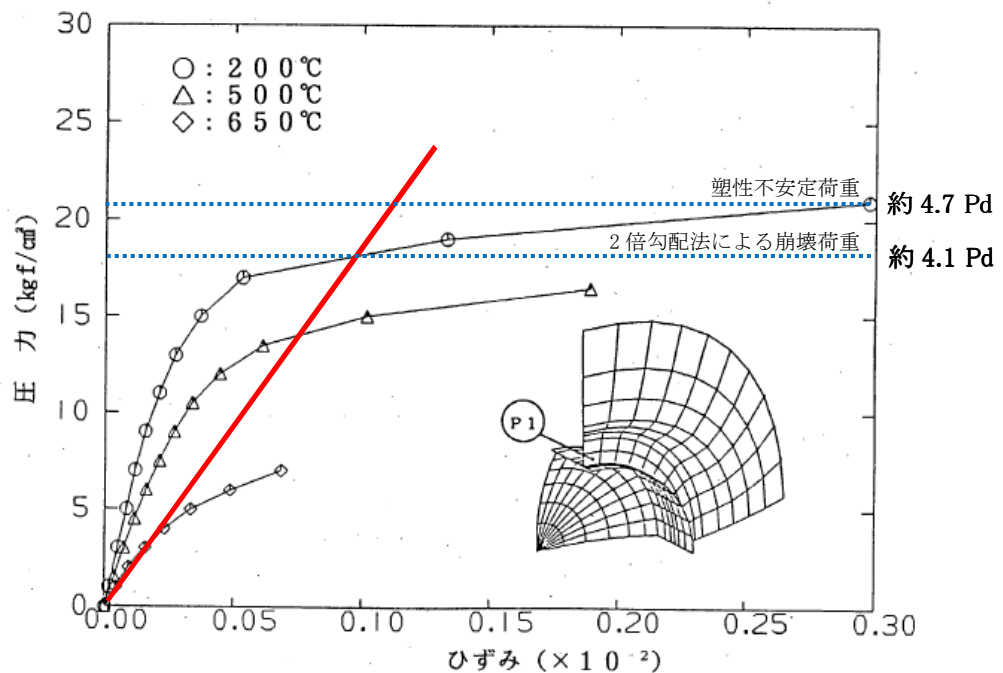
(3) 評価

a. 電共研の解析結果に基づく円筒胴取付部の評価

電共研において、代表プラントの原子炉格納容器本体を、機器搬出入用ハッチ取付部（円筒胴及び補強板）を含みモデル化し解析し耐性評価している。その結果、200℃における許容圧力は、約 4.1Pd（約 18kg/cm²）～約 4.7Pd（約 20.5kg/cm²）と得られている。（添付 2.3-1）

電共研の解析結果は、女川原子力発電所 2 号炉と代表プラントの主要部材の材料が同じであること、女川原子力発電所 2 号炉は代表プラントに対し同等以上の開口部の補強を行っていることから、女川原子力発電所 2 号炉へ適用可能である。（添付 2.3-2）

ひずみと圧力の関係を第 2.3-2 図に示す。



第 2.3-2 図 ひずみと圧力の関係

b. 設計・建設規格に基づく円筒胴の評価

機器搬出入用ハッチ円筒胴に対し、設計・建設規格の PVE-3230 (2) c 項を準用し、200℃における許容圧力を算出し、算出した許容圧力が 2Pd 以上であることを確認する。

評価の結果、機器搬出入用ハッチ円筒胴の許容圧力は、約 7.6Pd である。

機器搬出入用ハッチ円筒胴 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230 (2) c 項を準用

$$P_a = 4Bt / 3D_o$$

Do	胴の外径 (mm)	3,820
B	付録材料図表 Part7 図1・図3により求めた値	117
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	80
P _a	200℃における許容圧力 (MPa)	3.267
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	7.65

c. 機械工学便覧に基づく鏡板の座屈の評価

鏡板には、蓋を閉じる方向に原子炉格納容器の圧力が作用することから、外圧を受ける球殻の座屈応力の算出式を用いて座屈圧力（許容圧力）を算出し、算出した許容圧力が 2P_d 以上であることを確認する。

評価の結果、鏡板の許容圧力は、約 P_d である。

鏡板 : SGV49 (SGV480 相当)

蓋（球殻）の座屈圧力（許容圧力）P_{cr} を算出（機械工学便覧）

$$P_{cr} = 16.70 \cdot E \cdot (t/2a)^{2.5}$$

a	蓋板の内半径 (mm)	<input type="text"/>
t	鏡板の板厚 (mm)	30
E	200℃における縦弾性係数 (MPa)	191,000
P _{cr}	200℃における座屈圧力（許容圧力） (MPa)	<input type="text"/>
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _{cr} / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	<input type="text"/>

d. シール部の漏えい評価

機器搬出入用ハッチ及びハッチ近傍の原子炉格納容器をソリッド要素でモデル化し解析により算出したシール部の変形量が、許容変形量以下であることを確認する。この際、シール材については、改良 EPDM 材に取り替える予定であるため、改良 EPDM 材のガスケットについて、重大事故時の環境に晒されることによる劣化（復元量の低下）を考慮したシール部の漏えいを評価する。

(a) シール部の変形量

機器搬出入用ハッチ円筒胴が、原子炉格納容器本体の変形に追従して楕円に変形し、フランジ部に径方向のズレ及び軸方向の開口方向の変形が生じる。

解析により算出した 200℃、2Pd におけるフランジの変形量は、径方向で最大 mm (変位差)、軸方向で最大 mm (開口量) である。(添付 2.3-3)

(b) シール部の許容変形量

改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 2.3-2 表に示す。

第 2.3-2 表 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3 試験片の平均値 (% , % , %)

圧縮永久ひずみ試験結果から、改良 EPDM 材のガスケットを 200℃の飽和蒸気雰囲気に 168 時間晒した後の許容変形量（復元量）は、 mm (定格締付け量 mm × (100% - %)) である。

(c) 漏えい評価

200℃, 2Pd におけるフランジ部の開口量は, 最大で mm であり, 168 時間 200℃飽和蒸気に晒した後の改良 EPDM 材のガスケットの許容変形量(復元量) 約 mm 以下であることから, シール機能は維持され漏えいは生じないと考えられる。

(4) 評価結果

機器搬出入用ハッチの 200℃における円筒胴取付部の許容圧力は約 4.1Pd 以上, 円筒胴の許容圧力は約 7.6Pd, 鏡板の許容圧力(座屈圧力)は Pd である。また, 200℃, 2Pd におけるフランジ部の変形量は許容変形量以下である。

女川原子力発電所 2 号炉の機器搬出入用ハッチは, 200℃, 2Pd において耐圧部材及びシール部の機能は維持され, 放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

電共研における機器搬出入用ハッチ取付部の解析

1. 解析の概要

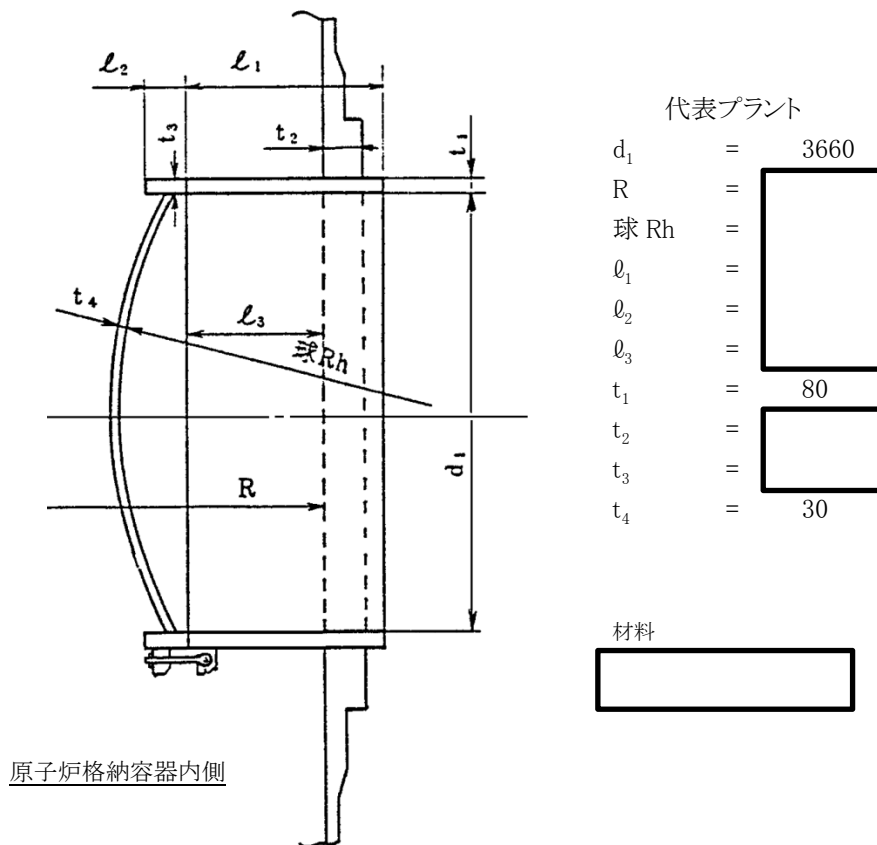
電共研において、軸対称の有限要素法モデルを用いて解析を実施し、代表プラントの機器搬出入用ハッチ取付部の耐性評価を実施している。

耐性評価では、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析において収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理し、機器搬出入用ハッチ取付部の許容圧力を評価している。

2. 解析条件

(1) 機器搬出入用ハッチの形状、主要寸法

電共研で評価した代表プラントの機器搬出入用ハッチの形状及び主要寸法を第 2.3-1-1 図に示す。

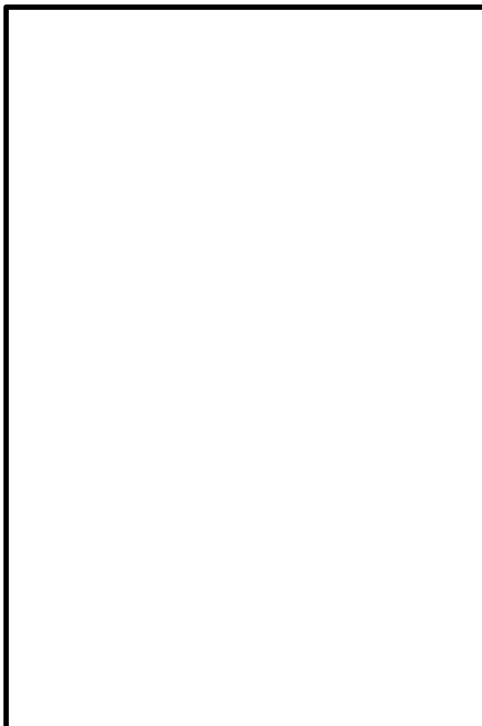


第 2.3-1-1 図 機器搬出入用ハッチの形状及び主要寸法

(2) 解析モデル

代表プラントの原子炉格納容器本体を、機器搬出入用ハッチ取付部（円筒胴及び補強板）を含みモデル化している。なお、フランジシール面については、シール材の材料物性はモデル化していない。

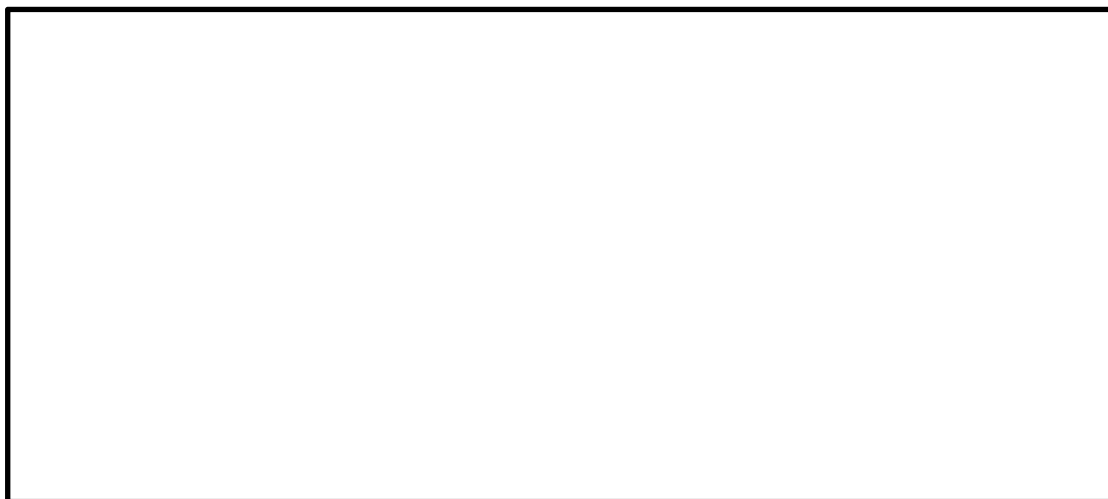
機器搬出入用ハッチ取付部の解析モデルを第 2.3-1-2 図に示す。



第 2.3-1-2 図 機器搬出入用ハッチ取付部の解析モデル

(3) 応力評価点

機器搬出入用ハッチ取付部の応力評価点を第 2.3-1-3 図に示す。

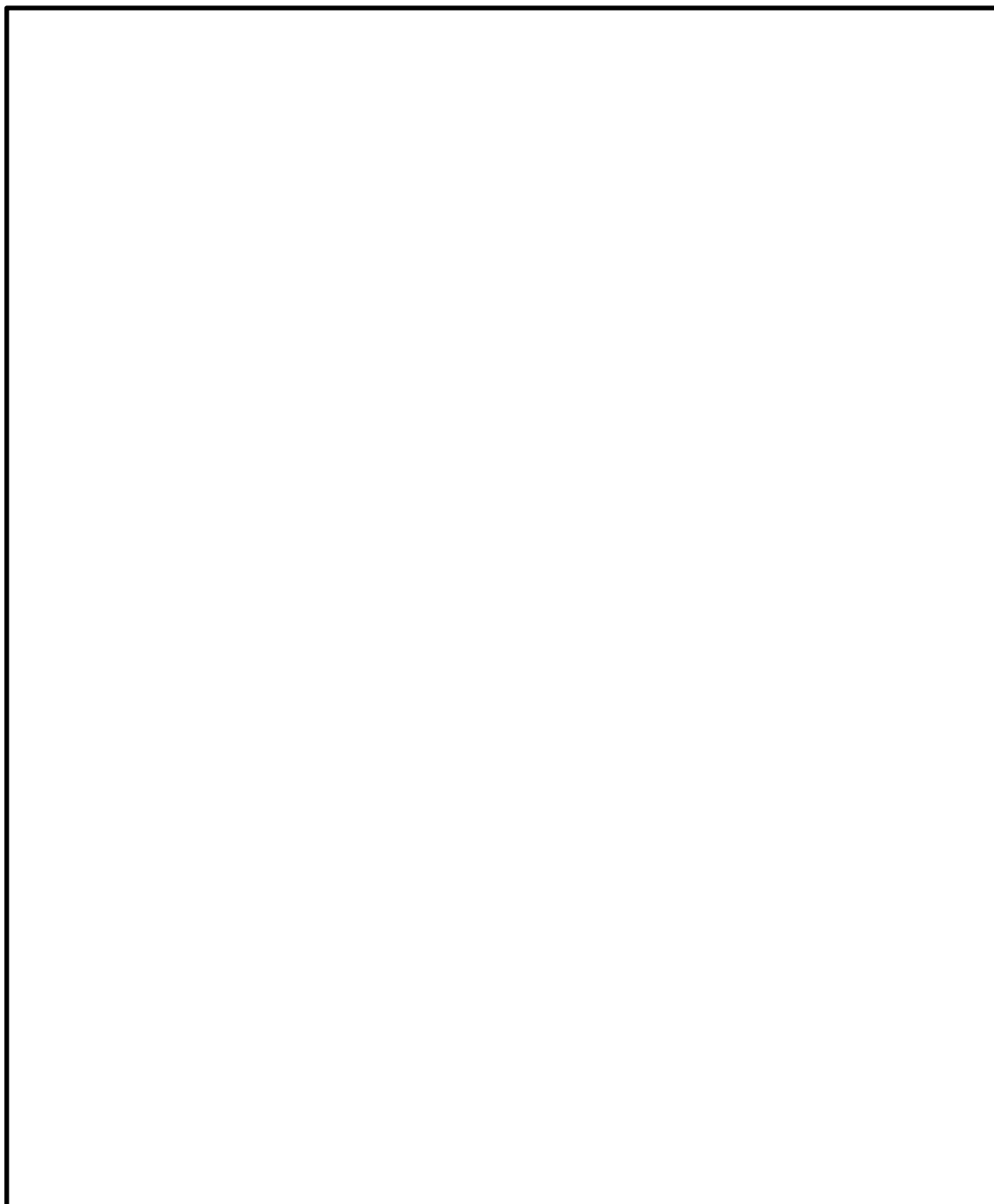


第 2.3-1-3 図 機器搬出入用ハッチ取付部の応力評価点

3. 解析結果

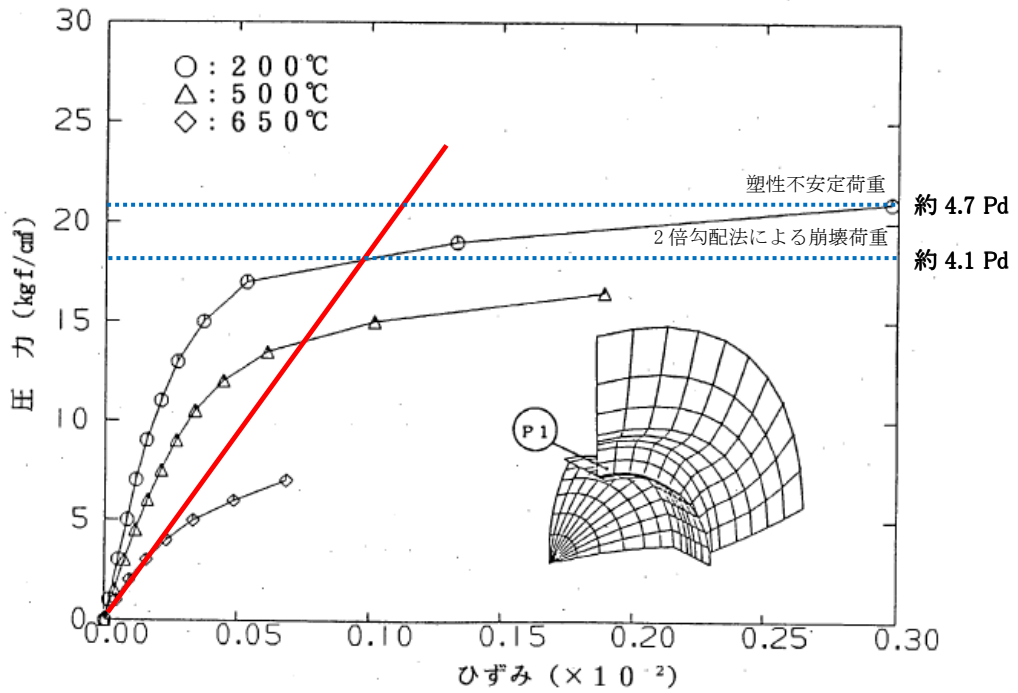
機器搬出入用ハッチ取付部の解析結果（200℃）を第 2.3-1-1 表に示す。

第 2.3-1-1 表 機器搬出入用ハッチ取付部の解析結果（200℃）



注) 1.記号 σ_t : 周方向膜応力 σ_a : 軸方向膜応力
2.引張り強さは、各温度における引張り試験結果による。

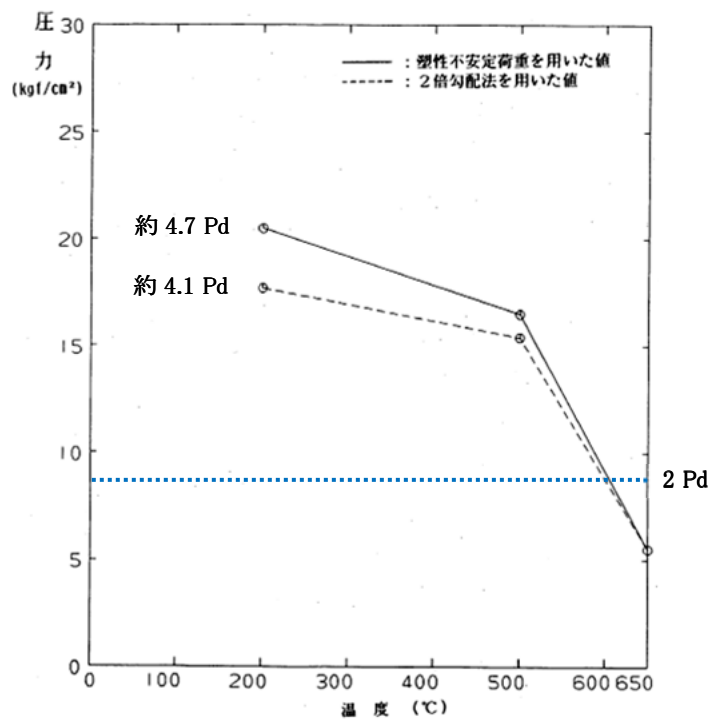
この解析結果において、応力値が最大となる評価点 P1（ハッチ取付部シェル）のひずみと圧力の関係を第 2.3-1-4 図に示す。



第 2.3-1-4 図 ひずみと圧力の関係

200°Cにおけるひずみと圧力の関係から、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析結果が収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理した結果、200°Cにおける許容圧力は、約 4.1Pd（約 18kgf/cm²）～約 4.7Pd（約 20.5kgf/cm²）との結果が得られている。

機器搬出入用ハッチ取付部の温度と許容圧力の関係を第 2.3-1-5 図に示す。



第 2.3-1-5 図 温度と許容圧力の関係

代表プラントの解析結果の適用性

女川原子力発電所 2 号炉の機器搬出入用ハッチの主要部材の材料は、代表プラントと同じであり、また、主要寸法は、代表プラントの主要寸法とほぼ同様である。

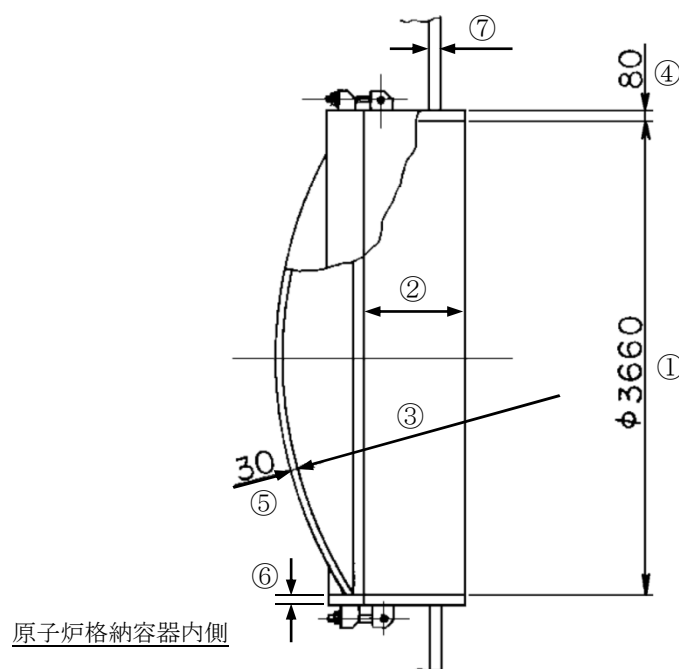
機器搬出入用ハッチの形状を第 2.3-2-1 図に、代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉の機器搬出入用ハッチの主要寸法比較を第 2.3-2-1 表に示す。

機器搬入用ハッチ円筒胴取付部は大開口であり、その周辺に応力集中が生じるため開口部の補強を行っている。

代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉の補強を比較すると、女川原子力発電所 2 号炉は、代表プラントに対し同等以上の補強を行っている。

以上から、代表プラントの解析結果を用いた女川原子力発電所 2 号炉の評価は、保守的な評価と考えられる。

代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉の機器搬入用ハッチ円筒胴取付部の補強の比較を第 2.3-2-2 表に示す。



第 2.3-2-1 図 機器搬出入用ハッチの形状（女川原子力発電所 2 号炉）

第 2.3-2-1 表 機器搬出入用ハッチの主要寸法比較

項目			代表プラント	女川原子力発電所 2 号炉
最高使用圧力 (kPa)			427	427
耐圧部材料				
円筒胴内径	①	mm	3,660	3,660
円筒胴長	②	mm		
蓋鏡内半径	③	mm		
円筒胴板厚	④	mm	80	80
鏡板板厚	⑤	mm	30	30
鏡板フランジ板厚	⑥	mm		
補強板板厚	⑦	mm		

第 2.3-2-2 表 機器搬入用ハッチ円筒胴取付部の補強の比較

項目		代表プラント	女川原子力発電所 2 号炉
補強に必要な面積	mm ²		
補強に有効な面積	mm ²		
補強に有効な面積 / 補強に必要な面積	-		

シール部の変形による漏えいの解析

1. 解析の概要

機器搬出入用ハッチ及びハッチ近傍の原子炉格納容器をソリッド要素でモデル化し、解析によりシール部の変形量を算出する。

2. 解析条件

(1) 解析モデル

原子炉格納容器胴部の変形に伴う機器搬出入用ハッチの変形挙動を確認するため、原子炉格納容器本体と機器搬出入用ハッチをモデル化する。シール部については、フランジ面の摩擦及びヒンジボルトの締め付けトルクを考慮する。

機器搬出入用ハッチの解析モデルを第 2.3-3-1 図に示す。



第 2.3-3-1 図 機器搬出入用ハッチの解析モデル

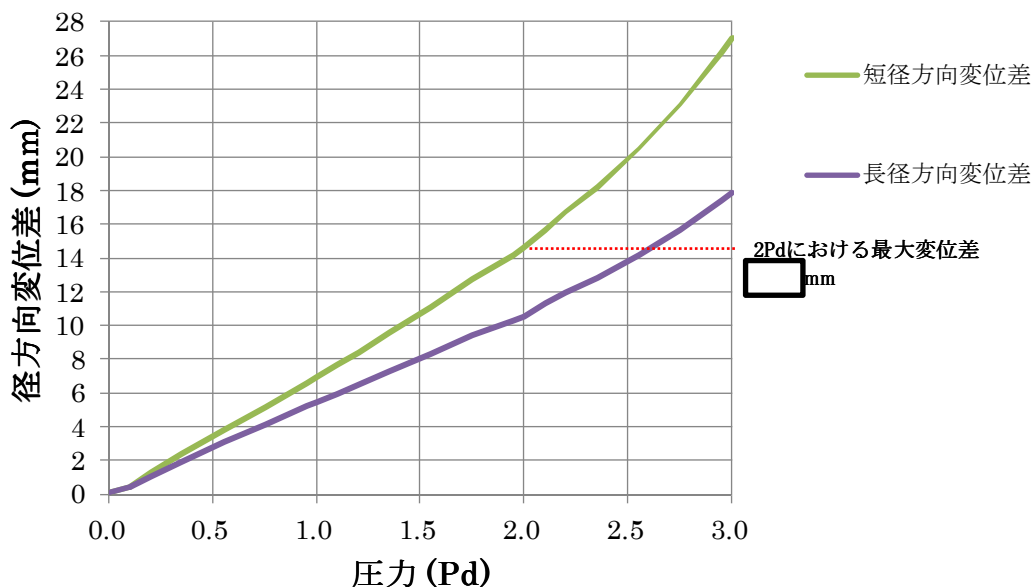
(2) 荷重条件

3Pd まで内圧を加える。

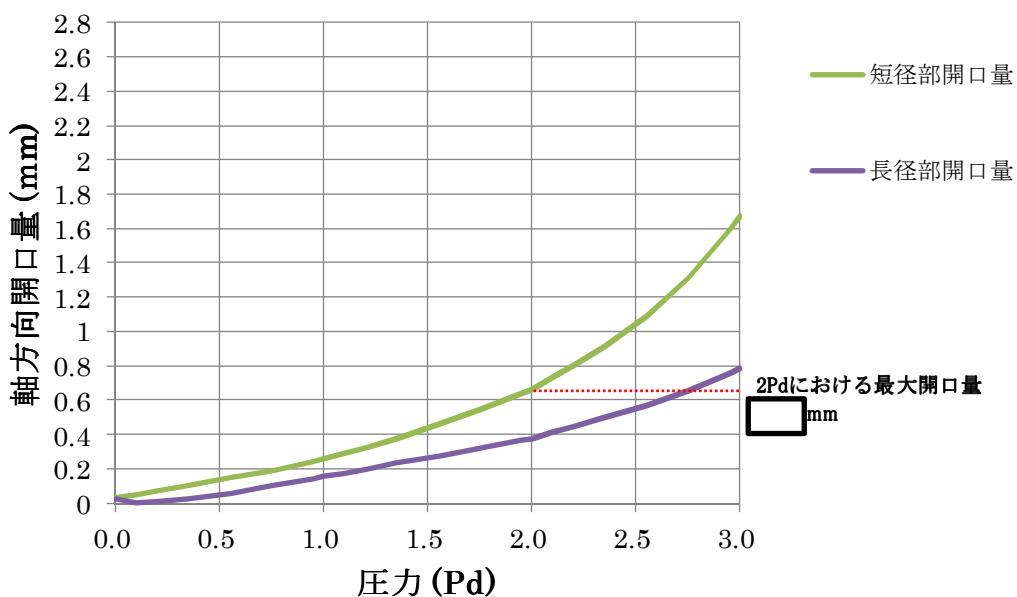
3. 解析結果

200°C, 2Pdにおけるシール部の変形量は, 径方向が最大 mm (短径方向変位差) であり, 軸方向が最大 mm (短径部開口量) である。

圧力と径方向変形量 (変位差) の関係を第 2.3-3-2 図に, 圧力と軸方向変形量 (開口量) の関係を第 2.3-3-3 図に示す。



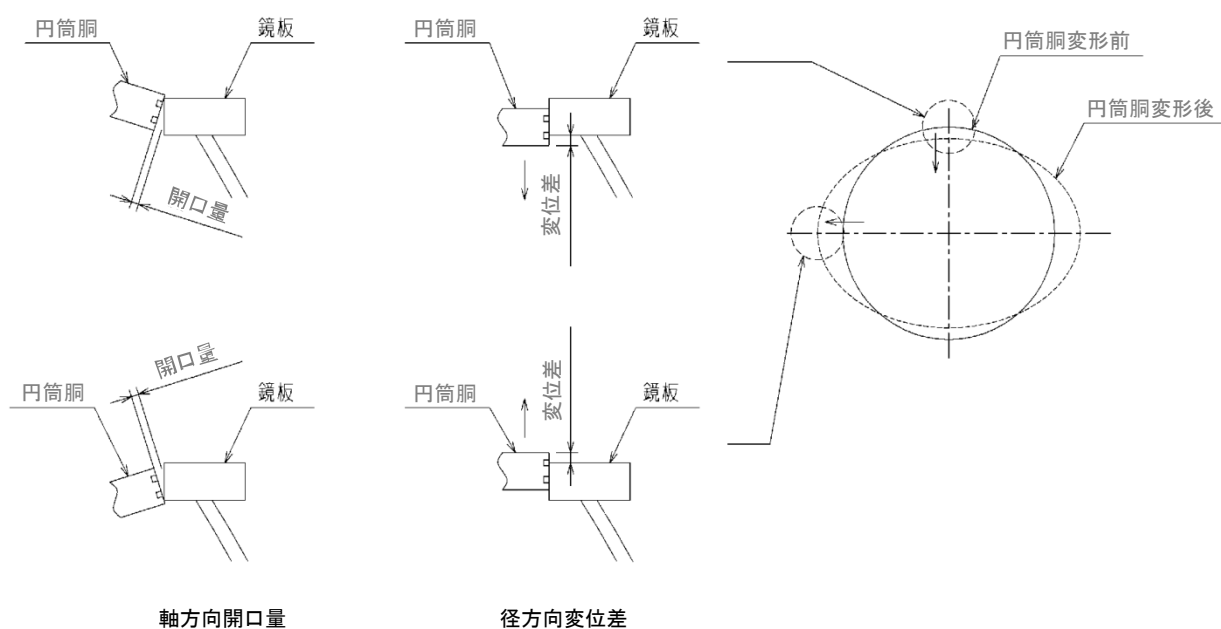
第 2.3-3-2 図 圧力と径方向変形量 (変位差) の関係



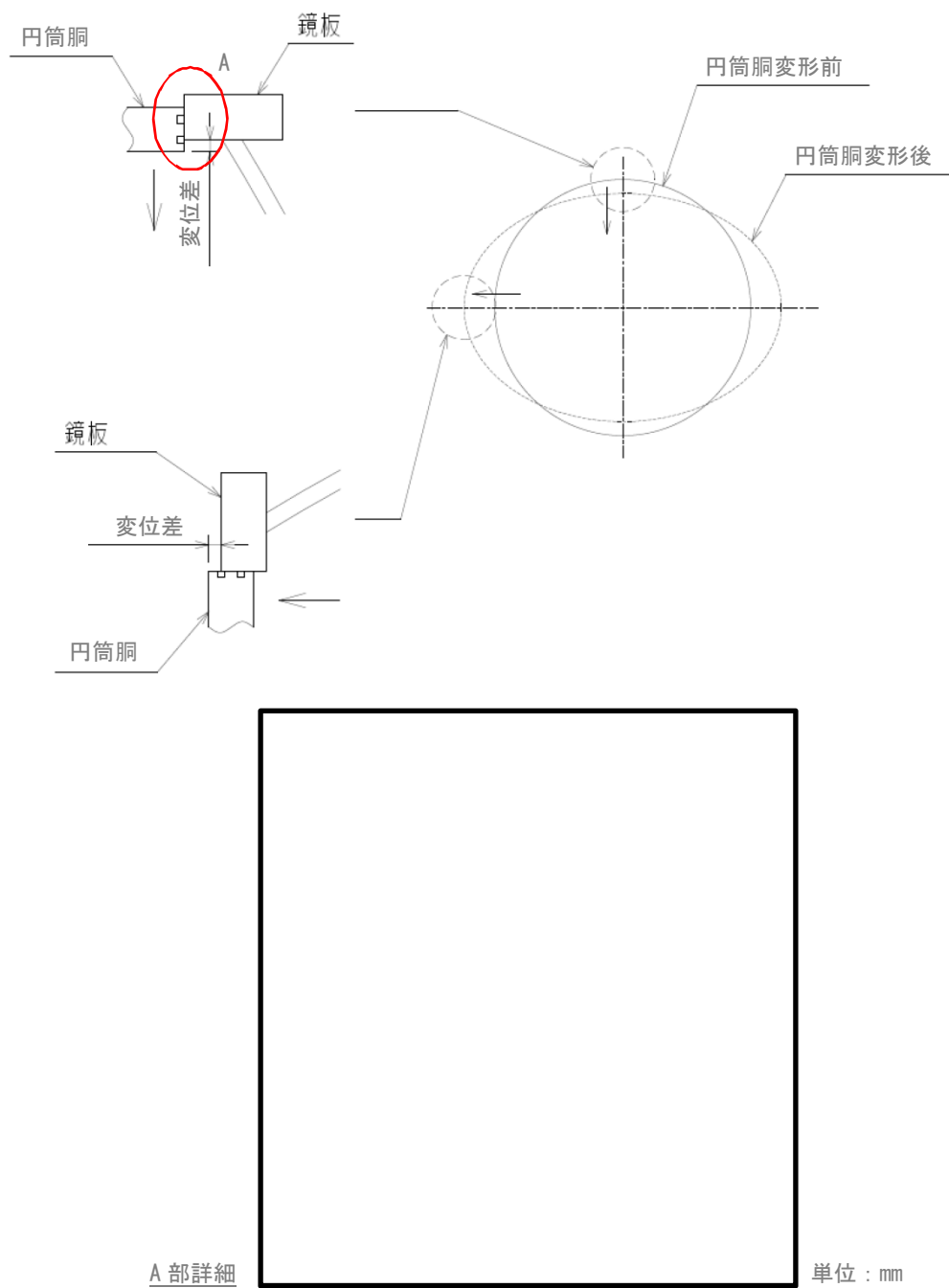
第 2.3-3-3 図 圧力と軸方向変形量 (開口量) の関係

機器搬出入用ハッチは、原子炉格納容器内の圧力上昇により鏡板が機器搬出入用ハッチ円筒胴に押付けられる構造であり、内圧により鏡板は開くことはない。この解析結果は、機器搬出入用ハッチ円筒胴が原子炉格納容器本体の変形に追従し楕円に変形することによるシール部の変形を示しており、原子炉格納容器内の圧力上昇に伴いシール部の変形量も増加する。

径方向変位差及び軸方向開口量の概念図を第 2.3-3-4 図に、2Pd における径方向変位差とガスケットの位置関係を第 2.3-3-5 図に示す。



第 2.3-3-4 図 径方向変位差及び軸方向開口量の概念図



第 2.3-3-5 図 2Pd における径方向変位差とガスケットの位置関係

2.4 所員用エアロック

(1) 評価部位

所員用エアロックは、扉、隔壁、円筒胴及び開閉ハンドルからなる。原子炉格納容器の貫通部に円筒胴を溶接固定し、円筒胴の両端に人が出入りする開口部を設けた隔壁を溶接している。この開口部に枠板を溶接し、枠板の前面を扉で塞ぎ、枠板と扉間にガスケットを挟み込みシールする構造である。また、隔壁には扉開閉ハンドル軸等が貫通しており、貫通部にシール材を使用している。

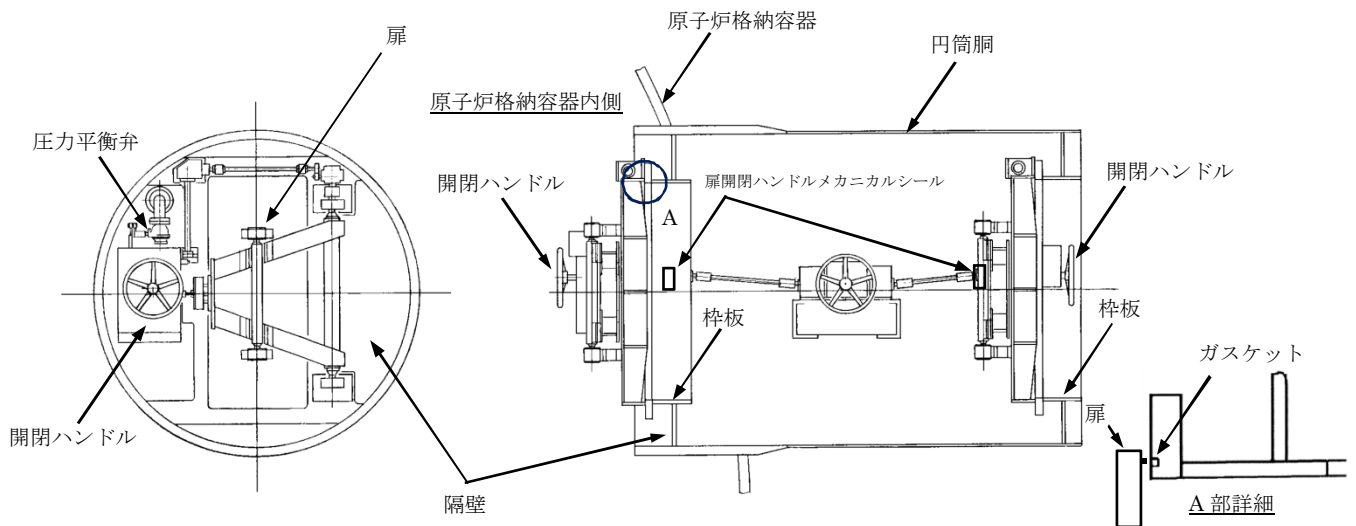
所員用エアロックの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、評価条件 200℃, 2Pd においては、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、有意な圧縮力が所員用エアロックに生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

また、シール部は、原子炉格納容器内の圧力が上昇した際に、扉が枠板の前面に押付けられる構造であり、内圧により扉が開くことはないが、扉の変形により扉と枠板の前面にずれ（開口）が生じることが考えられる。

200℃, 2Pd における所員用エアロックの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、また、扉の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいが想定される。

このため、所員用エアロックについて、扉及び隔壁並びに円筒胴の延性破壊、扉の変形及びガスケットのシール能力低下による漏えいを評価する。

所員用エアロックの構造を第 2.4-1 図に示す。



第 2.4-1 図 所員用エアロックの構造

(2) 評価方針

扉及び隔壁並びに円筒胴について、設計・建設規格を準用した評価式により、200°Cにおける隔壁の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、2Pd 以上であることを確認する。

また、シール部については、機械工学便覧の変位量評価式を用いて、200°C、2Pd における扉の変形量を算出し、許容変形量以下であることを確認する。

所員用エアロックの評価対象と評価方法を第 2.4-1 表に示す。

第 2.4-1 表 所員用エアロックの評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
扉及び隔壁	延性破壊	・既工認の評価値を用いて、200°Cにおける $2/3S_u$ が発生するときの許容圧力を評価
円筒胴	延性破壊	・設計・建設規格（PVE-3230）を準用し、200°Cにおける $2/3S_u$ が発生するときの許容圧力を評価
扉のシール部 (扉, ガスケット)	変形, シール 能力低下	・機械工学便覧のはりのたわみ計算式による変形量及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を踏まえ、シール機能を評価
扉以外のシール部 (圧力平衡弁, 扉開閉ハンドルメカニカルシール)	シール 能力低下	・PEEK 材の材料特性及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果により評価

(3) 評価

a. 設計・建設規格に基づく扉及び隔壁の評価

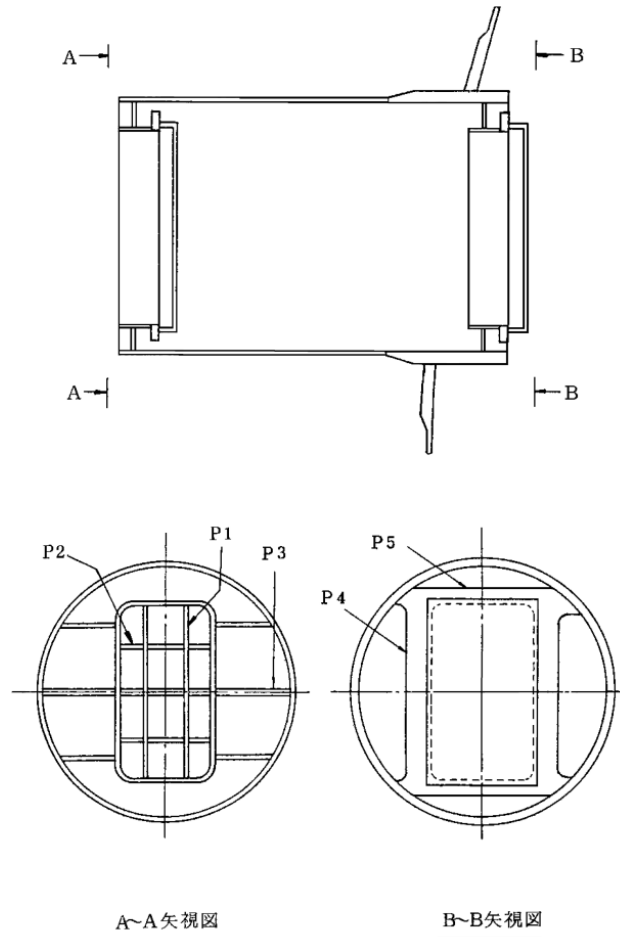
扉及び隔壁には内圧による応力が生じるため、一次応力評価を実施する。扉及び隔壁の発生応力は圧力に比例することから、既工認の応力強さから許容値 (σ_a) の応力が発生する時の圧力を算出し、扉及び隔壁の許容圧力として評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ (S_u) の $2/3$ とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器(クラス MC 容器)の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方である。

また、設計・建設規格の表 PVB-3110-1 に規定される形状係数 α を考慮して許容値を設定する。

評価の結果、所員用エアロックの扉及び隔壁の許容圧力は、最も裕度が低い評価点 (P5) で約 $2.9Pd$ である。

所員用エアロック扉及び隔壁の応力評価点を第 2.4-2 図に、所員用エアロック扉及び隔壁の評価結果を第 2.4-2 表に示す。



第 2.4-2 図 所員用エアロック扉及び隔壁の応力評価点

第 2.4-2 表 所員用エアロック扉及び隔壁の評価結果

応力評価点	①既工認における 応力強さ (MPa)	②200℃における 許容応力* (MPa)	③200℃における 許容圧力 (MPa) (②/①×0.427)	④最高使用圧力に対する 許容応力の比 (-) (③/0.427)
P1	18	422	10.01	23.4
P2	74	422	2.43	5.6
P3	100	422	1.80	4.2
P4	57	393	2.94	6.8
P5	129	381	1.26	2.9

*: 許容応力は, $2/3 \cdot Su \cdot \alpha$ 。ここで α は, P1, P2, P3 : $\alpha = 1.5$, P4 : $\alpha = 1.4$, P5 : $\alpha = 1.357$ 。

b. 設計・建設規格に基づく円筒胴の評価

所員用エアロック円筒胴に対し, 設計・建設規格の PVE-3230 (2) a 項及び c

項を準用し 200°Cにおける許容圧力を算出し、算出した許容圧力が 2Pd 以上であることを確認する。

評価の結果、所員用エアロック円筒胴の許容圧力は、約 8.0Pd 以上である。

① 所員用エアロック外側円筒胴 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2) a 項を準用

$$P_a = 2 S \eta t / (D_i + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200°Cにおける設計引張強さ (MPa) ここでは、200°Cでの 2/3Su を用いて算出する	281
D _i	胴の内径 (mm)	2,600
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	16
P _a	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	3.433
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	8.04

② 所員用エアロック内側円筒胴 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230 (2) c 項を準用

$$P_a = 4Bt / 3D_o$$

D _o	胴の外径 (mm)	2,760
B	付録材料図表 Part7 図 1・図 3 により求めた値	117
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	80
P _a	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	4.522
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	10.58

c. シール部の漏えい評価

扉のシール部は、高温状態で圧力を受けることによる扉の変形及びシール材の劣化（復元量の低下）によるシール機能の低下が想定される。

扉のシール部について、機械工学便覧のはりのたわみ計算式を用い 200℃、2Pd における扉の変形量を算出し、算出した変形量が許容変形量以下であることを確認する。この際、シール材については、改良 EPDM 材に取り替える予定であるため、改良 EPDM 材のガスケットについて、重大事故時の環境に晒されることによる劣化（復元量の低下）を考慮したシール部の漏えいを評価する。

また、扉以外のシール部について、材料仕様により評価する。

(a) 扉のシール部

i. 扉の変形量

機械工学便覧のはりのたわみ計算式を用い、200℃、2Pdにおける扉の変形量を評価した結果、変形量は mm である。 (添付2.4-1)

ii. 許容変形量

改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験結果を第2.4-3表に示す。

第 2.4-3 表 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

*1 : JIS K6262 に従い実施

*2 : 3 試験片の平均値 (% , % , %)

圧縮永久ひずみ試験結果から、改良EPDM材のガスケットを200℃の飽和蒸気雰囲気中に168時間晒した後の許容変形量（復元量）は、mm^{*1}である。

$$\begin{aligned} *1: \text{許容変形量} &= (\text{ガスケット高さ} \text{ mm} - \text{間隙 (溝深さ} \text{ mm} - \text{タング長さ} \text{ mm}) \\ &\quad - \text{必要押込み量} \text{ mm}^{*2} \times (100\% - \text{ \%}) = \text{ mm} \end{aligned}$$

*2: グループ&タングのフランジの必要押込み量については、添付2.4-2参照

iii. 漏えい評価

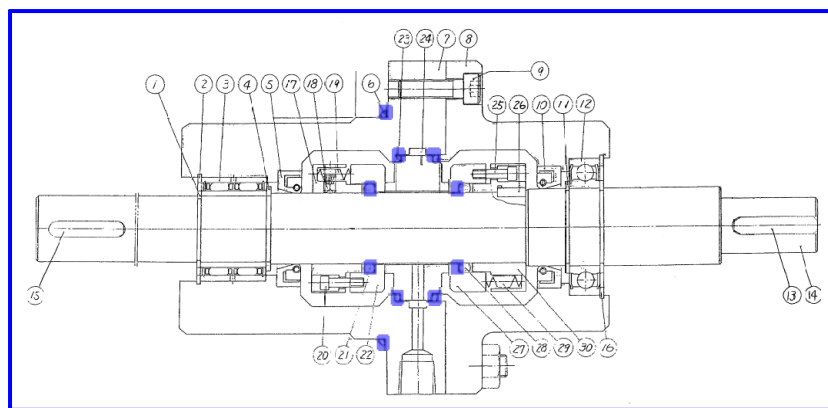
200℃、2Pdにおける扉シール部の変形量は、mmであり、許容変形量mm以下であることから、シール機能は維持され漏えいは生じないと考えられる。

(b) 扉以外のシール部

扉以外のシール部（圧力平衡弁及び扉開閉ハンドルメカニカルシール）は、フッ素系のシール材を使用している。

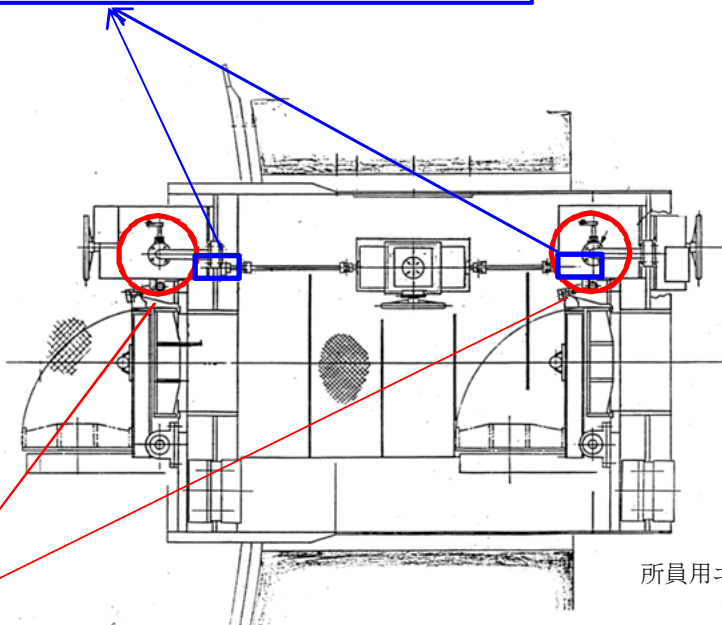
扉以外のシール部（圧力平衡弁及び扉開閉ハンドルメカニカルシール）に使用しているシール材を第2.4-3図に示す。

扉開閉ハンドルメカニカルシール概要図



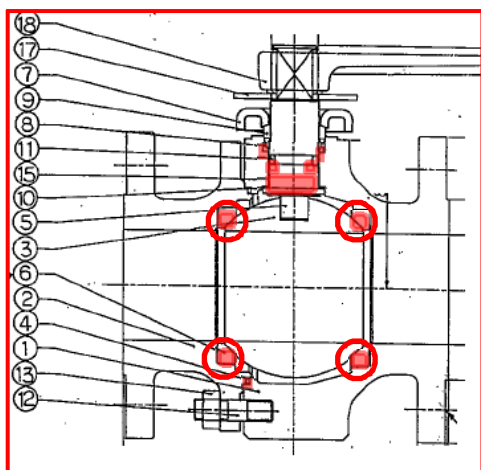
扉開閉ハンドルメカニカルシール部

- : フッ素ゴム使用箇所
- ⑥ : Oリング
- ⑳ : シャフトパッキン
- ㉓ : Oリング
- ㉘ : シャフトパッキン



所員用エアロック概要図

圧力平衡弁概要図



圧力平衡弁のシール部

- : フッ素樹脂及びフッ素ゴム使用箇所
- ④ : Oリング (フッ素ゴム)
- ⑥ : シート (フッ素樹脂)
- ⑧ : グランドパッキン (フッ素樹脂)
- ⑩ : スラストベアリング (フッ素樹脂)
- ⑪ : Oリング (フッ素ゴム)
- ⑮ : ステムベアリング (フッ素樹脂)

第2.4-3図 扉以外のシール部に使用しているシール材

これらのフッ素系シール材については、より耐性が高い改良EPDM材、PEEK材に変更する。

扉以外のシール部（圧力平衡弁及び扉開閉ハンドルメカニカルシール）のシール材を第2.4-4表に、フッ素ゴム、フッ素樹脂、PEEK材の材料特性比較を第2.4-5表に示す。

第2.4-4表 扉以外のシール部のシール材

扉以外のシール部		現行	変更後
圧力平衡弁	④⑩リング	フッ素ゴム	改良EPDM
	⑥シート	フッ素樹脂	PEEK
	⑧グランドパッキン	フッ素樹脂	PEEK
	⑩スラストベアリング	フッ素樹脂	PEEK
	⑮ステムベアリング	フッ素樹脂	PEEK
扉開閉用ハンドル メカニカルシール	⑥⑳リング	フッ素ゴム	改良EPDM
	㉑㉓シャフトパッキン	フッ素ゴム	改良EPDM

第2.4-5表 フッ素ゴム、フッ素樹脂、PEEK材の材料特性比較

項目	フッ素系シール材		PEEK材
	フッ素ゴム	フッ素樹脂	
耐熱温度 (°C)	200	260	250
耐放射線 (Gy)	約 $10^3 \sim 10^5$	約 $10^2 \sim 10^4$	約 10^7

扉以外のシール部（圧力平衡弁及び扉開閉用ハンドルメカニカルシール）のシール材である改良EPDM材及びPEEK材は、第2.4-3表及び第2.4-5表に示すとおり200°C、2Pdにおける耐性を有している。

(4) 評価結果

所員用エアロックの200°Cにおける扉及び隔壁の許容圧力は約 Pd, 円筒胴の許容圧力は約 8.0Pd である。また、200°C, 2Pd におけるシール部の変形量

は許容変形量以下である。

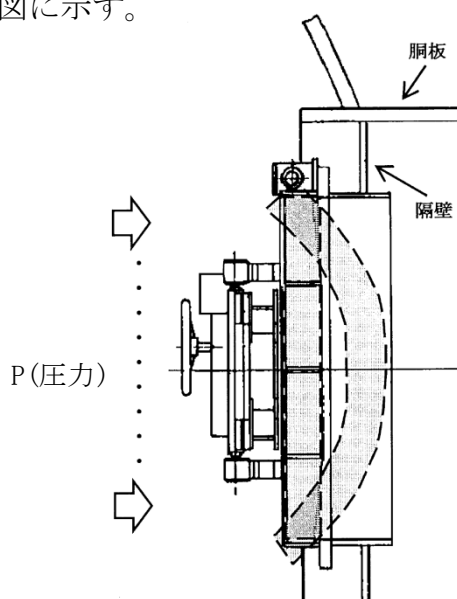
女川原子力発電所 2 号炉の所員用エアロックは、200℃、2Pd において耐圧部材及びシール部の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

所員用エアロックの扉の変形量

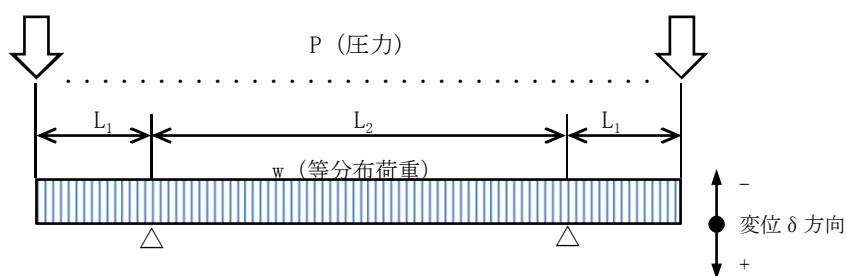
所員用エアロックの扉は、原子炉格納容器の圧力により扉を隔壁に押付ける構造であり、原子炉格納容器の圧力上昇により開口する力は作用しないが、高温状態で圧力を受けることによる扉の変形及びシール材の劣化（復元量の低下）によるシール機能の低下が想定される。

扉の変形量は、周囲4辺で支持される扉を、保守的に扉の上下のみで支持される梁モデルとし、機械工学便覧の変位量評価式を用い算出する。

所員用エアロックの扉変形概念図を第2.4-1-1図に、所員用エアロックの扉変形量評価モデルを第2.4-1-2図に示す。



第2.4-1-1図 所員用エアロックの扉変形概念図



第2.4-1-2図 所員用エアロックの扉変形量評価モデル

所員用エアロックの扉変形量評価モデルを基に、機械工学便覧の変位量評価式を用い扉シール部の変形量を算出した結果、 mm である。

$$\delta = \frac{w \times L_1}{24 \times E \times I} \times (3 \times L_1^3 + 6 L_1^2 \times L_2 - L_2^3) \quad (\text{機械工学便覧})$$

変位量 δ の算出に用いた値は以下のとおり。

L_1	支点からシール部中心までの長さ (mm)	32
L_2	支点間の長さ (mm)	1850
b_1	扉の全幅 (mm)	840
t_1	扉の板厚 (mm)	<input type="text"/>
b_2	扉垂直部材の幅 (mm)	
t_2	扉垂直部材の板厚 (最小値) (mm)	
w	2Pd による等分布荷重 ($P \times b_1$) (N/mm)	
I	断面二次モーメント ($b_1 \times t_1^3 + 4 \times b_2 \times t_2^3$) /12 (mm^4)	
E	縦弾性係数 (MPa)	<input type="text"/>

グループ&タングのフランジの締付量について

既往の電共研において、ドライウェル主フランジ等のフランジ形状を模擬した小型モデル試験による重大事故時環境条件に対するシール材の耐性評価を実施している。

1. 試験方法

予め定めた締付量で試験片（シリコンゴム）をフランジにセットし、昇温後温度を一定に保った状態で加圧媒体（蒸気）によって徐々に昇圧し、シール部からの漏えいを確認したときの圧力、温度を記録した。

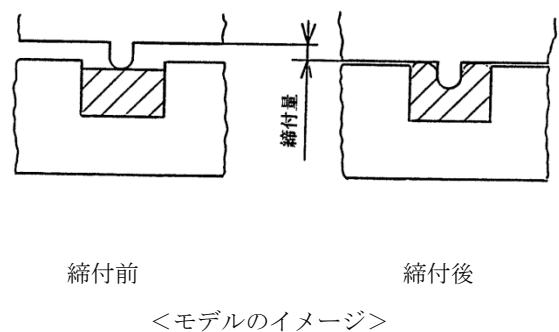
試験片に与える最大内圧は、約 MPa (kgf/cm²) とし、175℃、250℃、275℃、300℃、325℃、350℃の条件で試験を実施した。

2. シール材の小型モデル試験条件

シール材の小型モデル試験条件を第 2.4-2-1 表に示す。

第 2.4-2-1 表 シール材の小型モデル試験条件

温度	175℃～350℃
照射量	無, 有 (<input type="text"/> kGy)
加圧媒体	蒸気
シール構造	グループ&タング
締付量*1	$\delta_1 =$ <input type="text"/> mm $\delta_2 =$ <input type="text"/> mm $\delta_3 =$ <input type="text"/> mm $\delta_4 =$ <input type="text"/> mm



*1：締付量は、常温で試験装置にセットする時にガスケットが押しつぶされる量を示す。

定格締付量は mm。

シール材高さと同溝深さの設計値をもとにスペーサーを用いて締付量を設定した。

3. 試験結果

照射の有無に関係なく，縮付量 δ_1 (mm) において，275℃以下では漏えいは発生しなかった。

以上から，200℃，2Pd において，シール構造がグループ&タンクであるフランジにおいては，縮付量 mm までは漏えいが発生しない。

試験結果を第 2.4-2-2 表に示す。

第 2.4-2-2 表 試験結果

--

2.5 逃がし安全弁搬出入口

(1) 評価部位

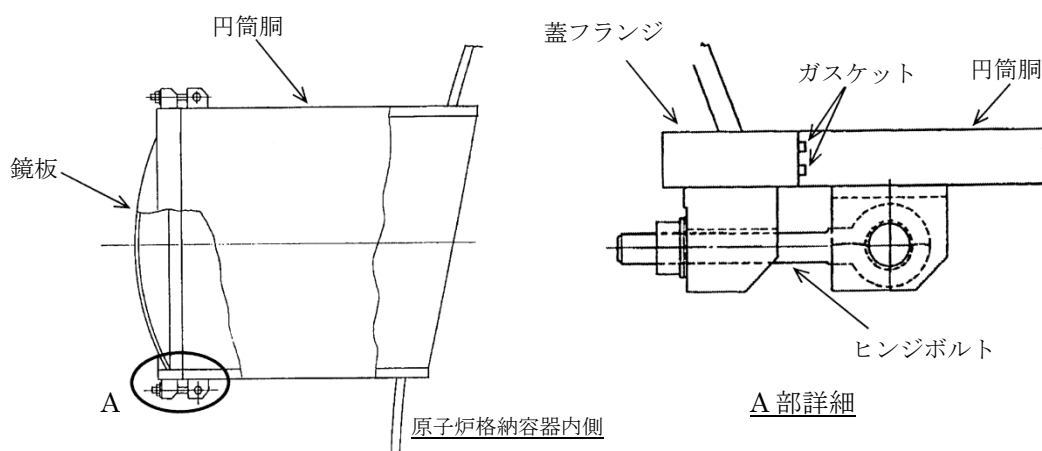
逃がし安全弁搬出入口は、鏡板、蓋フランジ、円筒胴及びヒンジボルトからなり、蓋フランジと円筒胴の間にガスケットを挟み込み、ヒンジボルトで締め付けシールする構造である。

逃がし安全弁搬出入口の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、評価条件 200℃、2Pd においては、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

シール部は、内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい、フランジ開口の進展によるヒンジボルトの破損が想定される。また、シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し、シール能力が低下することが想定される。

このため、逃がし安全弁搬出入口について、円筒胴、鏡板、フランジ及びヒンジボルトの延性破壊、また、シール部のフランジ開口及びシール能力低下による漏えいを評価する。

逃がし安全弁搬出入口の構造を第 2.5-1 図に示す。



第 2.5-1 図 逃がし安全弁搬出入口の構造

(2) 評価方針

円筒胴及び鏡板について、設計・建設規格を準用した評価式により、200℃における円筒胴及び鏡板の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、2Pd 以上であることを確認する。

フランジ及びヒンジボルトについて、電共研の解析結果を用いて、200℃におけるヒンジボルトの許容圧力を算出し、2Pd 以上であることを確認する。

シール部について、電共研の解析結果を用いて、フランジ部の開口量を評価し、許容開口量以下であることを確認する。

逃がし安全弁搬出入口の評価対象と評価方法を第 2.5-1 表に示す。

第 2.5-1 表 逃がし安全弁搬出入口の評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
円筒胴及び鏡板	延性破壊	・設計・建設規格（PVE-3230）を準用し、200℃における $2/3S_u$ が発生するときの許容圧力を評価
フランジ及びヒンジボルト	延性破壊	・電共研（代表プラントのハッチタイプフランジ構造）の解析結果を用いて、許容圧力を評価
シール部 （フランジ、ガスケット）	開口、シール能力低下	・電共研（代表プラントのハッチタイプフランジ構造）の解析結果及び改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を踏まえ、シール機能を評価

(3) 評価

a. 設計・建設規格に基づく円筒銅及び鏡板の評価

逃がし安全弁搬出入口の円筒胴及び鏡板に対し、設計・建設規格の PVE-3230(2)a 項及び e 項を準用した評価を行う。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（ S_u ）の $2/3$ とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器（クラス MC 容器）の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方で

ある。

評価の結果、逃がし安全弁搬出入口の円筒胴及び鏡板の許容圧力は、約 19.6Pd 以上である。

① 円筒胴 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)a 項を準用

$$Pa = 2 S \eta t / (Di + 1.2t)$$

S(=2/3Su)	200℃における設計引張強さ (MPa) ここでは、200℃での 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	2000
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	80
Pa	200℃における許容圧力 (MPa)	21.450
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	50.23

② 鏡板 : SGV49 (SGV480 相当)

PVE-3230(2)e 項を準用

$$Pa = 4 S \eta t / (Di + 0.4t)$$

S(=2/3Su)	200℃における設計引張強さ (MPa) ここでは、200℃での 2/3Su を用いて算出する	281
Di	胴の内径 (mm)	4000
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)	30
Pa	200℃における許容圧力 (MPa)	8.405
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	19.68

b. 電共研の解析結果に基づくフランジ及びヒンジボルトの評価

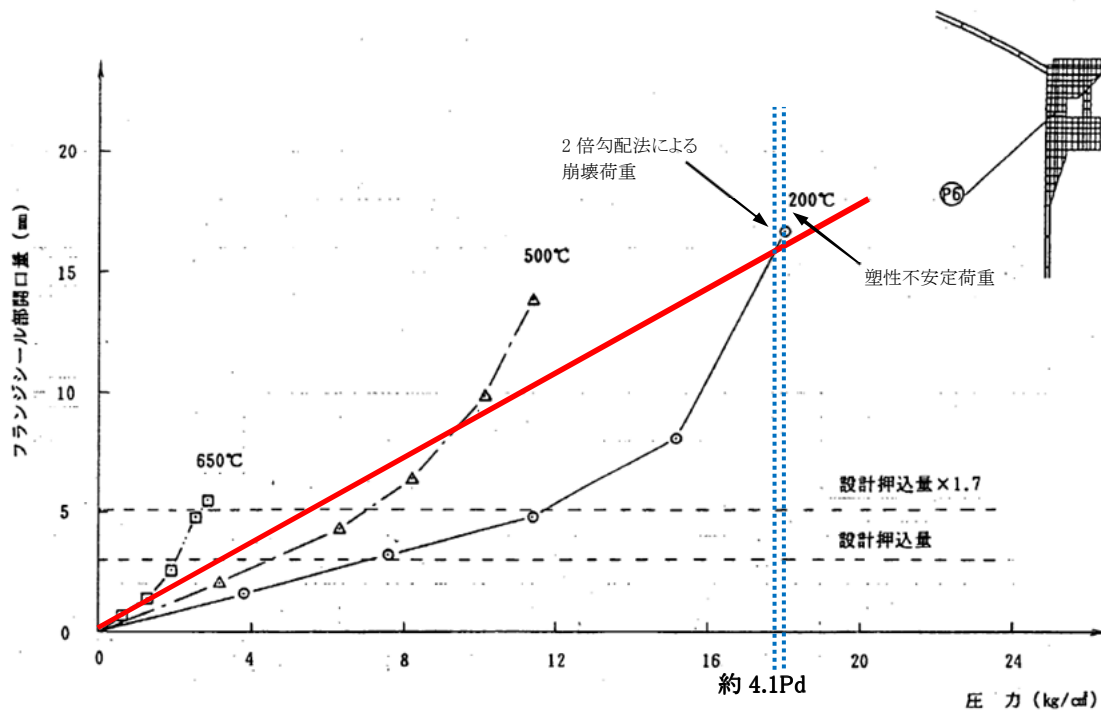
電共研において、代表プラントのハッチタイプフランジ構造について解析を行い耐性評価を実施している。その結果、フランジ部の評価においては、ヒンジボルトに生じる応力が大きくヒンジボルトの破損が支配的であり、200℃における許容圧力は、約 4.1Pd (約 18kgf/cm²) との結果が得られている。

(添付 2.5-1)

電共研の解析結果は、寸法（フランジ内径、ヒンジボルト径等）の差異の影響を評価することにより、女川原子力発電所 2 号炉へ適用可能である。

(添付 2.5-2)

圧力と開口量の関係を図 2.5-2 に示す。



第 2.5-2 図 圧力と開口量の関係

c. シール部の漏えい評価

(a) フランジの開口量

逃がし安全弁搬出入口のフランジ部の 200℃、2Pd における開口量は、電共研のハッチタイプフランジ構造解析結果である 3.5 mm から、代表プラントと女川原子力発電所 2 号炉の寸法の差異を考慮して算出し、 mm である。

(b) 許容開口量

改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 2.5-2 表に示す。

第 2.5-2 表 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3 試験片の平均値 (% , % , %)

圧縮永久ひずみ試験結果から、改良 EPDM 材のガスケットを 200°C の飽和蒸気雰囲気に 168 時間晒した後の許容開口量（復元量）は、 mm（定格締付け量 mm × (100% - %)）である。

(c) 漏えい評価

200°C、2Pd におけるフランジ部の開口量は mm であり、168 時間 200°C 飽和蒸気に晒した後の改良 EPDM 材のガスケットの許容開口量（復元量） mm 以下であることから、シール機能は維持され漏えいは生じないと考えられる。

(4) 評価結果

逃がし安全弁搬出入口の 200°C における許容圧力は、設計・建設規格に基づく評価において約 19.6Pd 以上、電共研での解析結果に基づく評価において約 4.1Pd 程度である。また、200°C、2Pd におけるフランジ部の開口量は許容開口量以下である。

女川原子力発電所 2 号炉の逃がし安全弁搬出入口は、200°C、2Pd において耐圧部材及びシール部の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

電共研におけるハッチタイプフランジの解析

1. 解析の概要

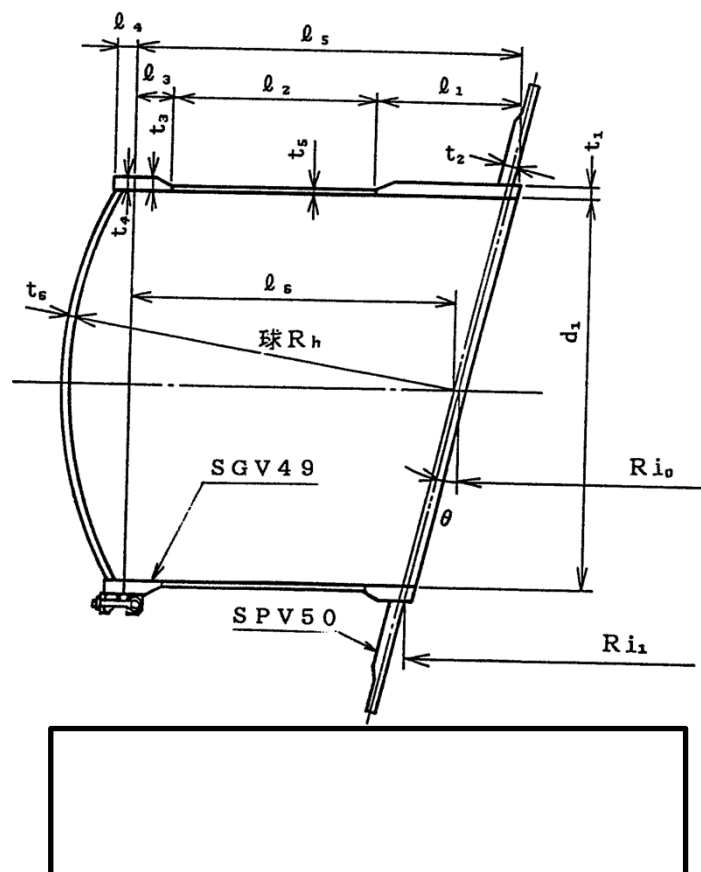
電共研において、軸対称の有限要素法モデルを用いて解析を実施し、代表プラントのハッチタイプフランジの耐性評価を実施している。

耐性評価では、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析において収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理し、ハッチタイプフランジの許容圧力を評価している。

2. 解析条件

(1) ハッチタイプフランジの形状、主要寸法

電共研で評価した代表プラントのハッチタイプフランジの形状及び主要寸法を第 2.5-1-1 図及び第 2.5-1-1 表に示す。



第 2.5-1-1 図 ハッチタイプフランジの形状及び主要寸法

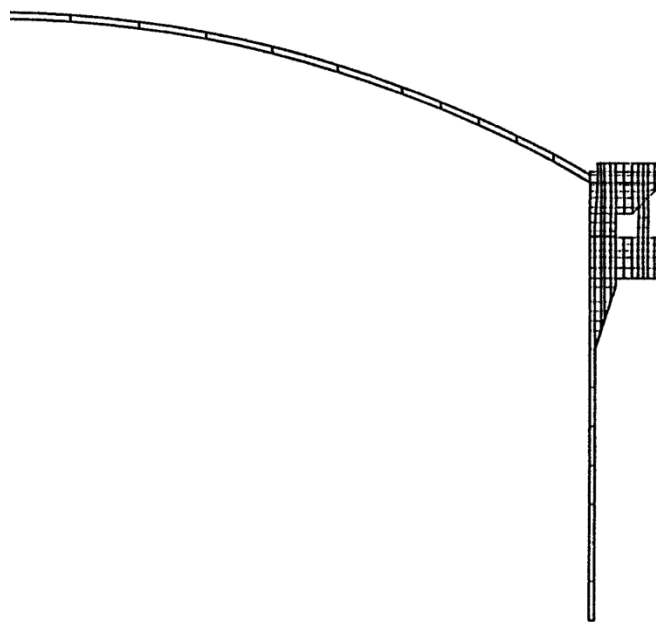
第 2.5-1-1 表 ハッチタイプフランジの形状及び主要寸法

項目		代表プラント	
耐圧部材料			
胴内径	mm		
フランジ外径	mm		
蓋鏡内半径	mm		
ボルト中心径	mm		
胴板厚	mm		
蓋板厚	mm		
フランジ板厚	mm		
ヒンジボルト径	mm		
ヒンジボルト本数	本		

(2) 解析モデル

ハッチタイプフランジの解析モデルは、ハッチのシェル形状、フランジを軸対称モデルにて、また、締付ボルトは、剛性等価な軸対称構造にてモデル化している。なお、フランジのシール材の材料物性はモデル化していない。

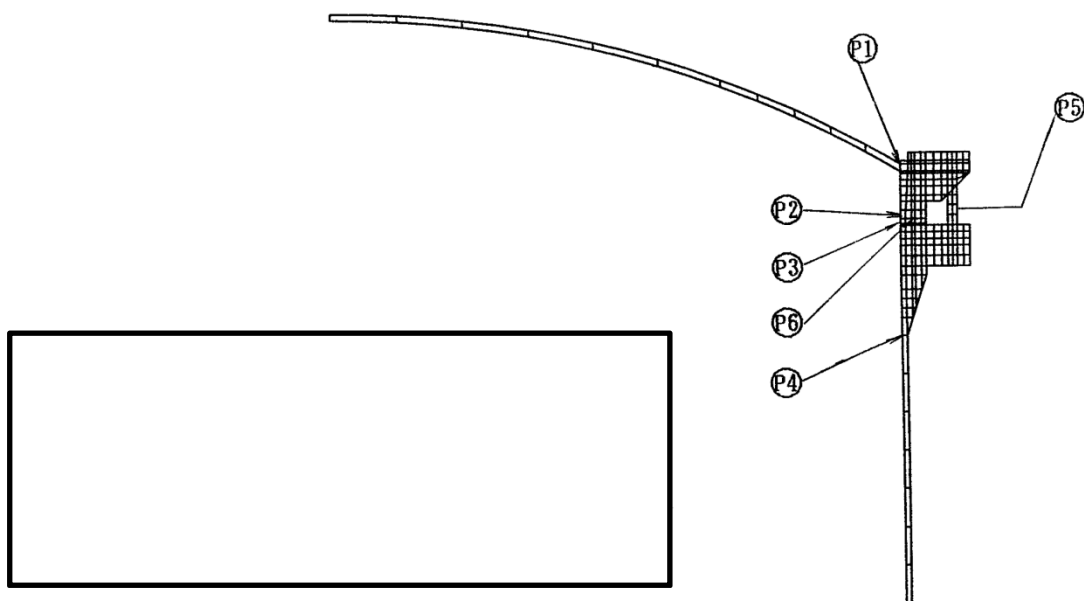
ハッチタイプフランジの解析モデルを第 2.5-1-2 図に示す。



第 2.5-1-2 図 ハッチタイプフランジの解析モデル
補足 19-120

(3) 応力評価点

応力評価点を第 2.5-1-3 図に示す。



第 2.5-1-3 図 ハッチタイプフランジの応力評価点

3. 解析結果

ハッチタイプフランジの解析結果 (200°C) を第 2.5-1-2 表に示す。

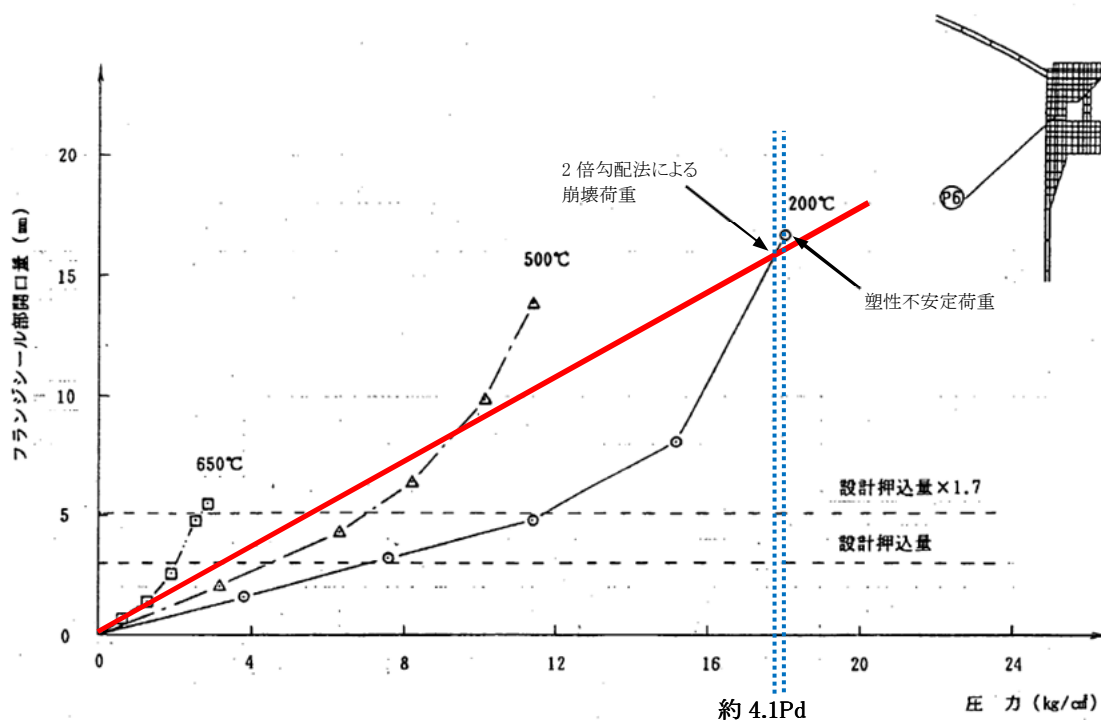
第 2.5-1-2 表 ハッチタイプフランジの解析結果 (200°C)

--

注) 1. 記号 σ_t : 周方向膜応力 σ_z : 軸方向膜応力
2. 引張り強さは、各温度における引張り試験結果による。

この解析結果から、評価点 P5（ボルト）の応力値が最大であり、ハッチタイプフランジの許容圧力の評価において、ボルトの評価が支配的になると考えられる。

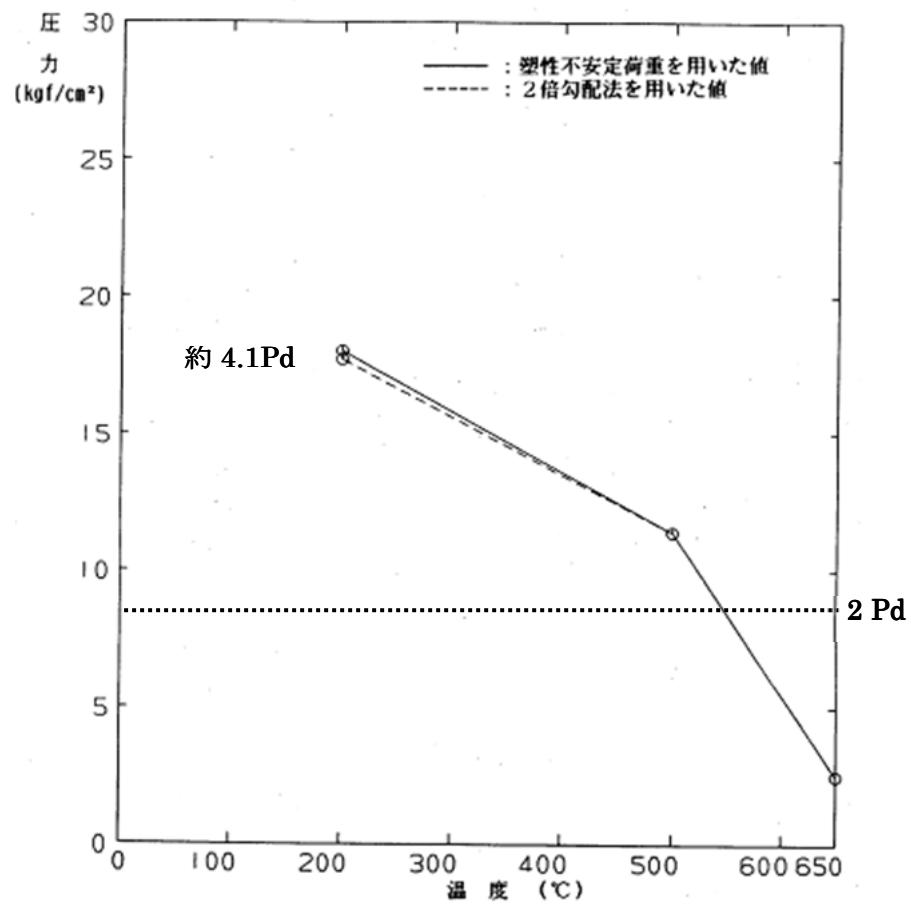
圧力と開口量の関係を第 2.5-1-4 図に示す。



第 2.5-1-4 図 圧力と開口量の関係

200°Cにおける圧力と開口量の関係から、破損荷重の下限を ASME Sec. III の手法による 2 倍勾配法により求めた崩壊荷重とし、また、上限を解析結果が収束性を失うときの荷重（塑性不安定荷重）として整理した結果、200°Cにおける許容圧力は、約 4.1Pd（約 18kgf/cm²）との結果が得られている。

ハッチタイプフランジの温度と許容圧力の関係を第 2.5-1-5 図に示す。



第 2.5-1-5 図 温度と許容圧力の関係

代表プラントのハッチタイプフランジの解析結果の適用性

代表プラントのハッチタイプフランジ解析結果（フランジ開口量及びヒンジボルトの応力）の女川原子力発電所 2 号炉の評価への適用性を以下に示す。

代表プラントのハッチタイプフランジと女川原子力発電所 2 号炉の逃がし安全弁搬出入口ハッチは、主要部材の材料は同じであるが寸法が異なる。

主要寸法比較を第 2.5-2-1 表に示す。

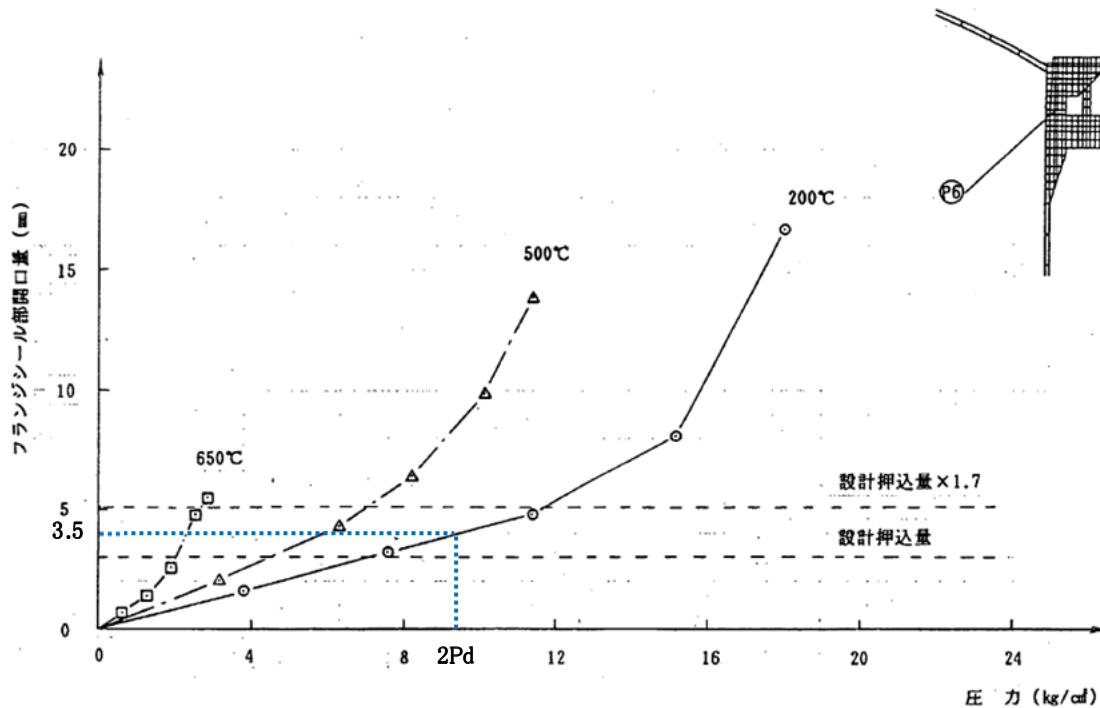
第 2.5-2-1 表 主要寸法比較

項目		代表プラント	女川原子力発電所 2 号炉
耐圧部材料			SGV49 (SGV480 相当)
胴内径	mm		2,000
フランジ外径	mm		
鏡板内半径	mm		
ボルト中心径	mm		2,330
胴板厚	mm		80
蓋板厚	mm		30
フランジ板厚	mm		
ヒンジボルト径	mm		42
ヒンジボルト本数	本		18

1. フランジ開口量

代表プラントのハッチタイプフランジの解析結果において、200°C、2Pd におけるフランジ開口量は 3.5 mm である。

圧力と開口量の関係（開口量）を第 2.5-2-1 図に示す。



第 2.5-2-1 図 圧力と開口量の関係 (開口量)

第 2.5-2-1 図より代表プラントの 200°C、2Pd 時のフランジ開口量は、弾性変形内である。これより、女川原子力発電所 2 号炉の 200°C、2Pd におけるフランジ開口量を、以下に従い代表プラントの解析結果から線形換算により算出する。

- ①ボルト中心径の比に比例
- ②ボルト径の比の 2 乗に反比例
- ③ボルト本数の比に反比例

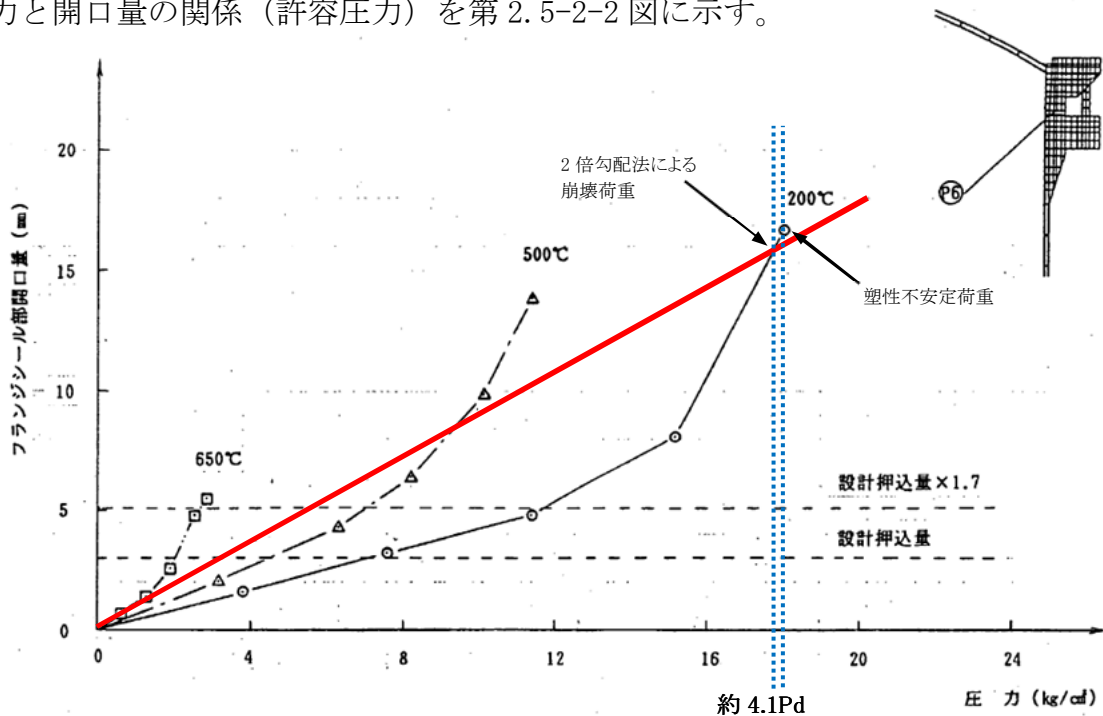
$$\text{フランジ開口量} = 3.5 \times (2330 / \square) \div (42 / \square)^2 \div (18 / \square) = \square \text{ mm}$$

以上から、女川原子力発電所 2 号炉の逃がし安全弁搬出入口ハッチのフランジ部の開口量は \square mm である。

2. ヒンジボルトの応力

代表プラントのハッチタイプフランジの解析結果において、200℃における許容圧力は、約 4.1Pd である。

圧力と開口量の関係（許容圧力）を第 2.5-2-2 図に示す。



第 2.5-2-2 図 圧力と開口量の関係（許容圧力）

第 2.5-2-2 図より代表プラントのボルトの許容圧力約 4.1Pd（約 18kg/cm²）は、弾塑性範囲である。このため線形換算により女川原子力発電所 2 号炉のヒンジボルトの許容圧力を算定することが出来ない。

これより、女川原子力発電所 2 号炉のヒンジボルトの応力が代表プラントのボルトの応力以下であることを以下に従い確認する。

- ①鏡板内半径の比の 2 乗に比例
- ②ボルト径の比の 2 乗に反比例
- ③ボルト本数の比に反比例

$$\text{ボルトの応力比} = (2000 / \square)^2 \div (42 / \square)^2 \div (18 / \square) = \square$$

$$\text{代表プラント} : 1 \geq \text{女川原子力発電所 2 号炉} : \square$$

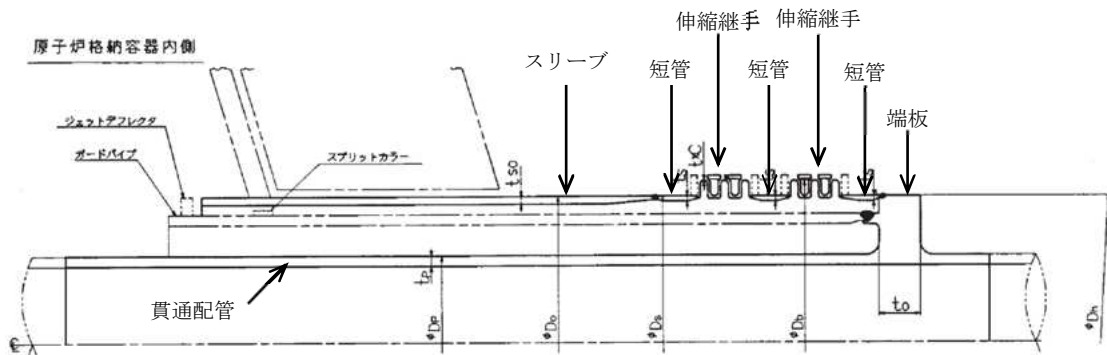
以上から、代表プラントのボルト応力よりも女川原子力発電所 2 号炉のヒンジボルト応力が小さくなることから、代表プラントのボルトの許容圧力評価結果を、女川原子力発電所 2 号炉の逃がし安全弁搬出入口の許容圧力の評価に適用することは保守的である。

2.6 配管貫通部

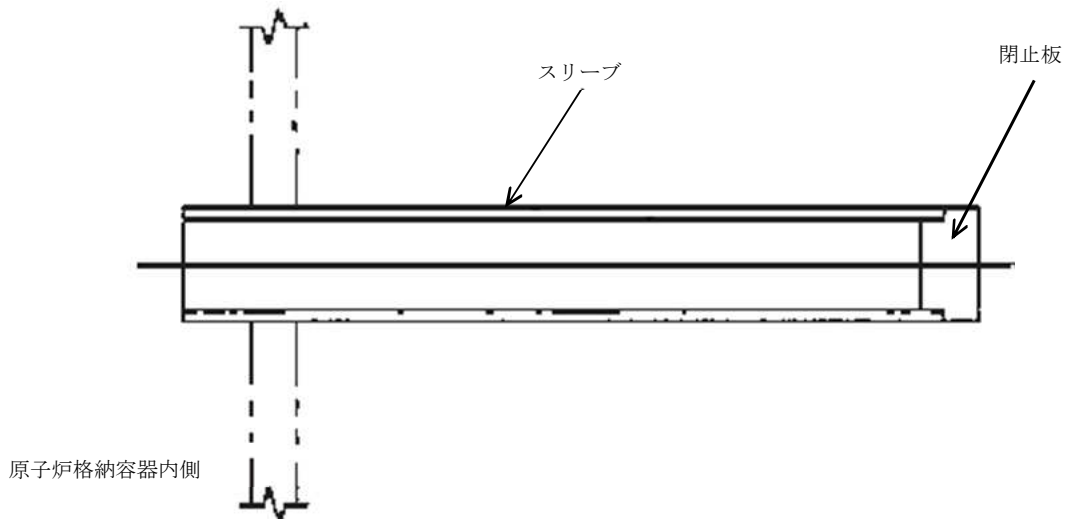
配管貫通部は、貫通配管、スリーブ、端板、フランジ、ボルト締付平板、締付ボルト、閉止板、伸縮継手及び短管により原子炉格納容器バウンダリを構成している。

また、フランジ及びボルト締付平板は、原子炉格納容器の貫通部に溶接固定されたフランジとボルト締付平板を締付ボルトで固定しており、フランジとボルト締付平板間にガスケットを挟み込みシールしている。

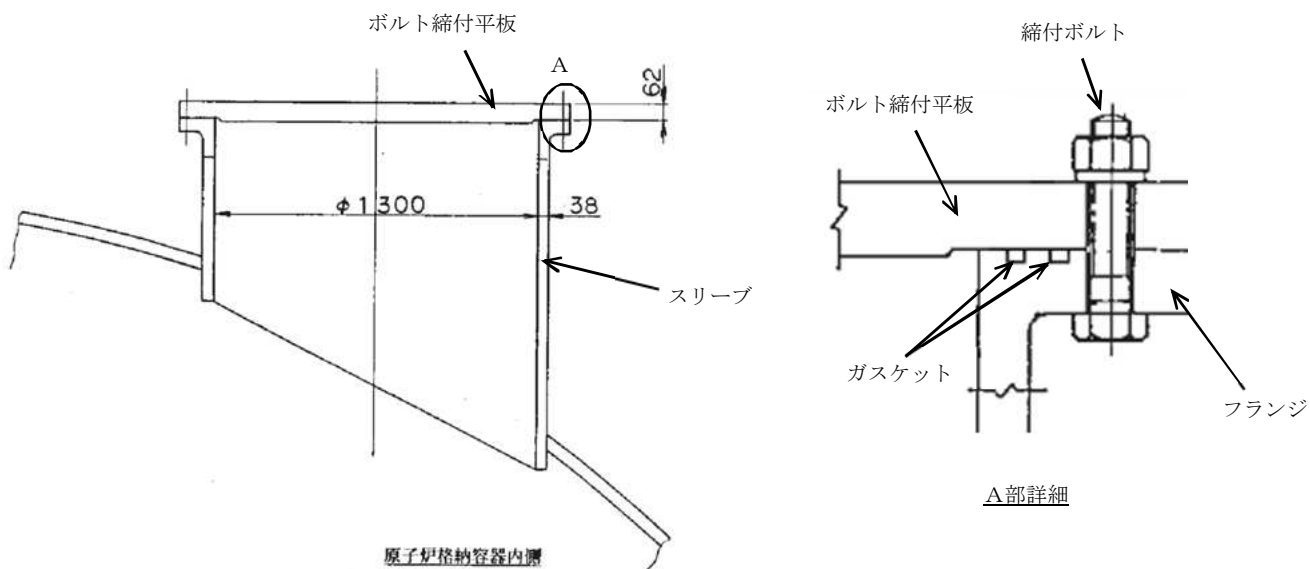
代表的な配管貫通部の構造を第2.6-1図に、閉止板の構造を第2.6-2図に、フランジ部の構造を第2.6-3図に示す。



第2.6-1図 配管貫通部の構造



第2.6-2図 閉止板の構造



第2.6-3図 フランジ部の構造

ここでは、配管貫通部の構成部品毎に、以下のとおり健全性を確認する。

- 2.6.1 項では、貫通配管の構造健全性を確認する。
- 2.6.2 項では、スリーブの構造健全性を確認する。
- 2.6.3 項では、端板の構造健全性を確認する。
- 2.6.4 項では、フランジ部の構造健全性及びシール機能維持を確認する。
- 2.6.5 項では、閉止板の構造健全性を確認する。
- 2.6.6 項では、伸縮継手の構造健全性を確認する。
- 2.6.7 項では、短管の構造健全性を確認する。

2.6.1 貫通配管

(1) 評価部位

貫通配管は、スリーブ等を介して原子炉格納容器本体に溶接構造で取り付けられている。

貫通配管の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、有意な圧縮力が貫通配管に生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pd の環境下においては、原子炉格納容器が変形することから、貫通配管に対し原子炉格納容器の変位による荷重が作用する。よって、貫通配管の機能喪失要因は、過度な曲げ荷重に伴う延性破壊が想定される。

このため、貫通配管においては曲げ荷重に伴う延性破壊を評価する。貫通配管に作用する荷重により発生する応力は、二次応力に区分されることから、一次＋二次応力について許容値を満足することを確認する。

なお、貫通配管に発生する応力は、貫通部の変位と配管系の拘束条件による影響を受ける。貫通部の変位は、熱膨張が主であり、熱膨張を計算する際の固定点（ドライウェル基部）から離れた位置ほど大きくなること、また、配管系の拘束条件による影響は、貫通配管の第一拘束点までの距離が短く、配管口径が大きいほど大きくなることを踏まえ、X-81（ドライウェル換気（排気））を代表評価する。（添付2.6.1-1）

(2) 評価方針

X-81（ドライウェル換気（排気））について、3次元梁モデルを用いた弾性解析を実施し、自重、圧力及び原子炉格納容器の変位により生じる応力を合計し、設計・建設規格のPPC-3530に規定される一次＋二次応力の許容応力を満足することを確認する。この許容応力を超過する場合は、設計・建設規格のPPB-3535

に規定される疲労評価を行い、疲労累積係数が1を超過しないことを確認することで、配管系が損傷に至らず、放射性物質の閉じ込め機能を維持できることを確認する。

(3) 評価

a. 貫通配管の評価

(a) 解析条件

X-81（ドライウエル換気（排気））貫通配管の解析モデルのうち、解析条件を第2.6.1-1表に示す。

第2.6.1-1表 X-81（ドライウエル換気（排気））貫通配管解析条件

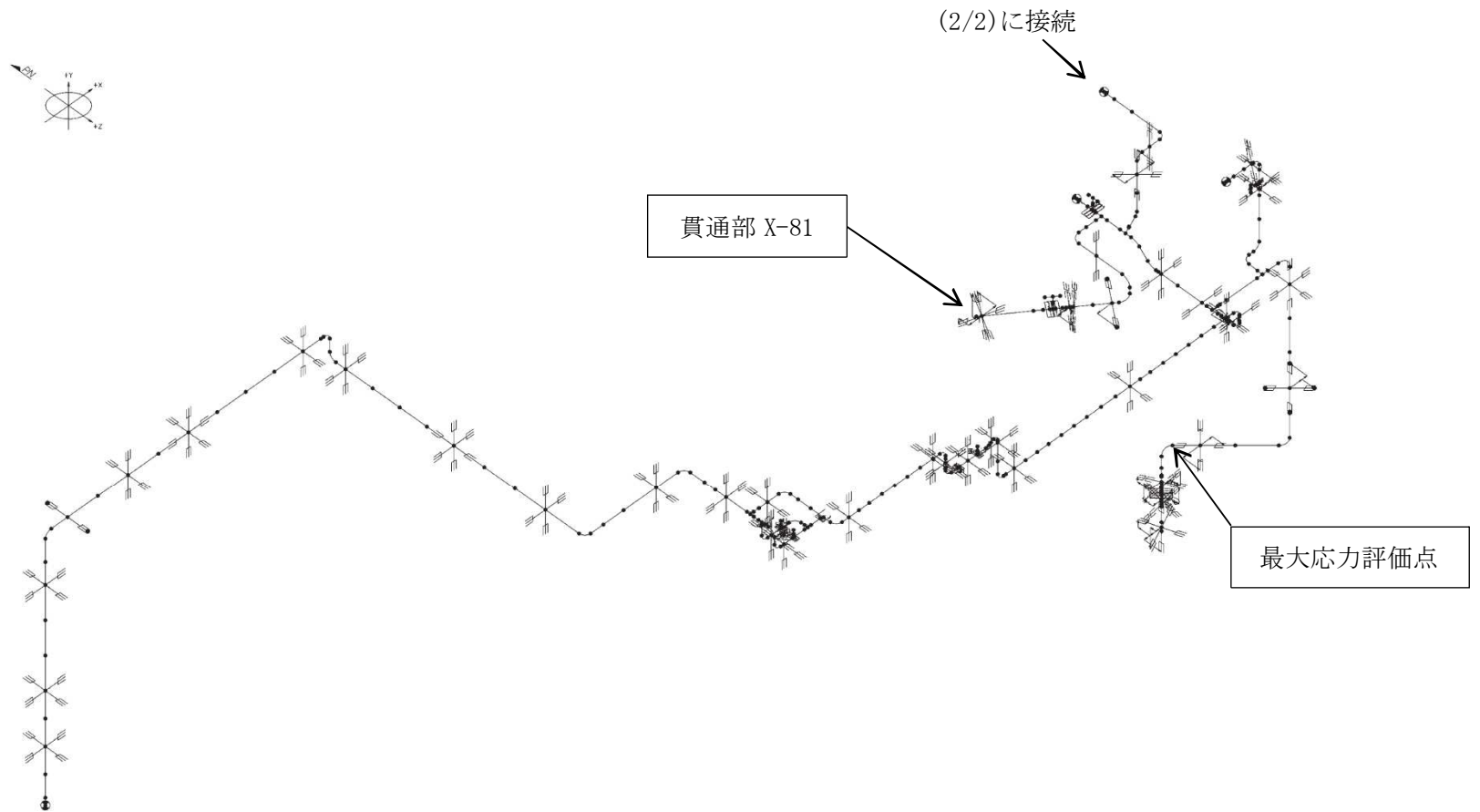
名称	単位	貫通配管
材料	—	SM41C（SM400C相当）
外径	mm	609.6
厚さ	mm	9.5
縦弾性係数	$\times 10^5$ MPa	1.91（200℃における値）
熱膨張係数	$\times 10^{-6}$ mm/mm℃	12.09（200℃における値）
熱計算温度	℃	200
計算圧力	MPa	0.854

荷重条件の原子炉格納容器変位は、貫通配管の設置高さにおける値を用いる。X-81（ドライウエル換気（排気））の荷重変位を第2.6.1-2表に示す。

第2.6.1-2表 X-81（ドライウエル換気（排気））荷重変位

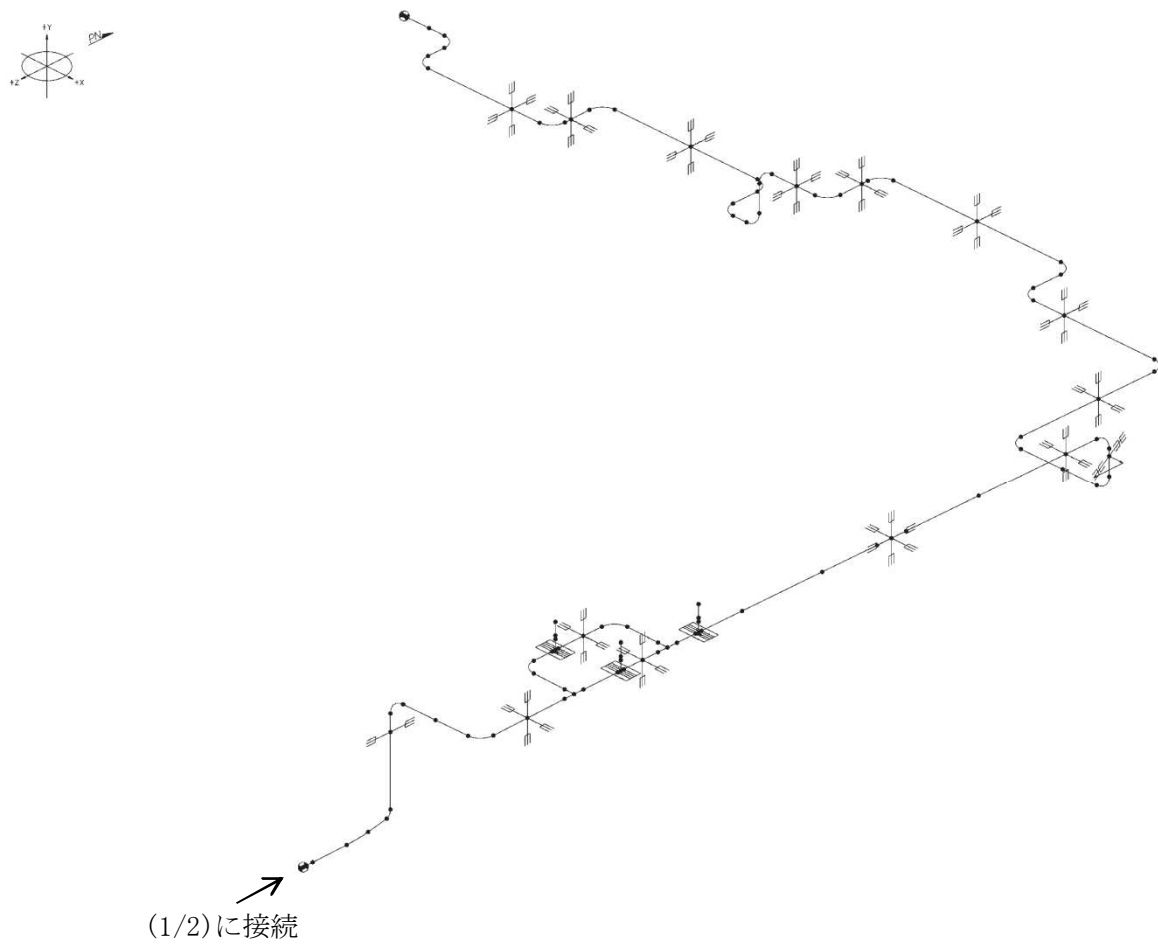
温度(℃)	圧力(MPa)	原子炉格納容器貫通部変位(mm)	
		水平（格納容器外向き）	鉛直（格納容器上向き）
200	0.854	31.5	36.4

また、評価対象となるX-81（ドライウエル換気（排気））近傍の配管解析モデルを第2.6.1-1図に示す。



添付図
0-2 AC-102
全体図

第 2.6.1-1 図 X-81 (ドライウェル換気 (排気)) 近傍の配管解析モデル (1/2)



第 2.6.1-1 図 X-81 (ドライウェル換気 (排気)) 近傍の配管解析モデル (2/2)

(b) 評価方法

i. 強度計算に使用する記号の定義

管の応力計算に用いる記号について以下に示す。

記号	単位	説明
D_0	mm	管の外径
M_a	N・mm	管の機械的荷重（自重その他の長期的荷重に限る）により生ずるモーメント
M_c	N・mm	管の熱による支持点の変位及び熱膨張により生ずるモーメント
P	MPa	最高使用圧力
S_a	MPa	許容応力
S_c	MPa	室温における設計・建設規格 付録材料図表Part5 表5 に規定する材料の許容引張応力
S_h	MPa	使用温度における設計・建設規格 付録材料図表Part5 表5 に規定する材料の許容引張応力
S_n	MPa	一次応力と二次応力を加えて求めた応力
Z	mm ³	管の断面係数
f	-	設計・建設規格 PPC-3530に規定する許容応力低減係数
i_1, i_2	-	設計・建設規格 PPC-3530に規定する応力係数
t	mm	管の厚さ

ii. 材料の許容応力

設計・建設規格PPC-3530に規定される要求事項に基づき評価を行う。なお、応力計算に使用する管の外径及び厚さは、公称値を用いる。

(i) 一次＋二次応力 (S_n) [設計・建設規格 PPC-3530(1) a項]

$$S_n = \frac{P \cdot D_0}{4t} + \frac{0.75i_1 \cdot M_a + i_2 \cdot M_c}{Z}$$

一次＋二次応力の許容応力は、設計・建設規格の PPC-3530(1) c項に基づき、次式により算出する。

$$S_a = 1.25f \cdot S_c + (1 + 0.25f)S_h$$

(ii) 疲労累積係数 [設計・建設規格 PPB-3535]

上記(i)により算出した一次＋二次応力 (S_n) が許容応力 (S_a) を超過する場合は、設計・建設規格のPPB-3535に規定される疲労累積係数を算出し、1以下になることを確認する。

(c) 評価結果

X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管の解析の結果，一次＋二次応力が許容応力を上回ったことから，設計・建設規格のPPB-3535に規定される疲労累積係数を算出した結果，1以下である。

評価結果を第2.6.1-3表に示す。

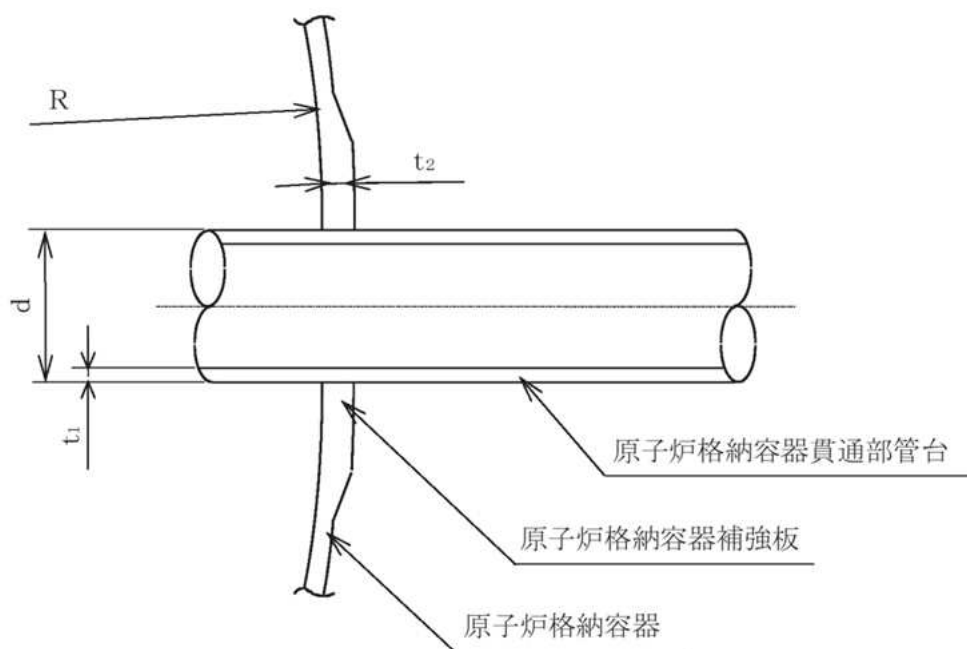
第2.6.1-3表 X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管の評価結果

最大応力 評価点	一次＋二次応力評価 (MPa)		疲労評価	
	発生応力	許容応力	疲労累積 係数	許容値
27	699	402	0.0036	1

b. 貫通部の評価

(a) 解析条件

X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管が接続する貫通部の形状を第2.6.1-2図に、主要寸法を第2.6.1-4表に、管台（スリーブ）に作用する配管反力（死荷重及び熱荷重）を第2.6.1-5表に示す。



第2.6.1-2図 X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管の形状

第2.6.1-4表 X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管の主要寸法（単位：mm）

貫通部番号	用途	d	t ₁	t ₂	R
X-81	ドライウェル換気（排気）	609.6	31.0		11400

第2.6.1-5表 管台に作用する配管反力（死荷重及び熱荷重）

貫通部番号	荷重の種類	死荷重	熱荷重
X-81	軸力P(N)		
	鉛直方向モーメントML(N・mm)		
	水平方向モーメントMC(N・mm)		

(b) 評価方法

i. 荷重の組合せ及び許容応力

原子炉格納容器貫通部に対する荷重は、原子炉格納容器内圧力と貫通部管台荷重の組合せとし、許容応力を第2.6.1-6表に示す。

第2.6.1-6表 許容応力 (単位: MPa)

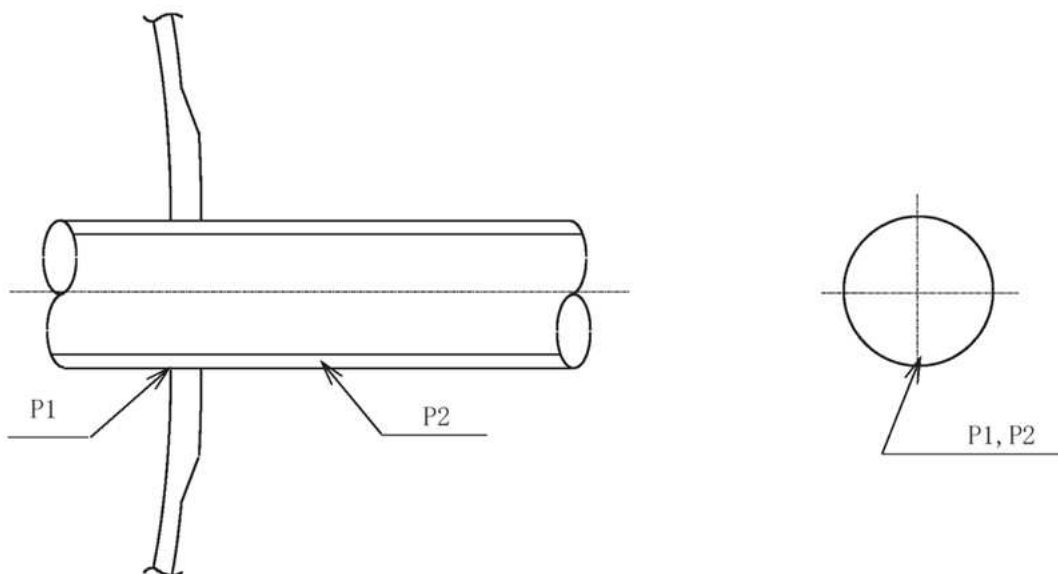
材料	許容応力強さ (200°Cにおける値)
	一次+二次応力
貫通部管台取付部 SPV50 (SPV490相当)	501 (=3S)
貫通部管台 STS42 (STS410相当)	342 (=3S)

ii. 応力評価点

応力評価点を第2.6.1-7表及び第2.6.1-3図に示す。

第2.6.1-7表 応力評価点

応力評価点	応力評価箇所
P1	X-81 貫通部管台取付部
P2	X-81 貫通部管台

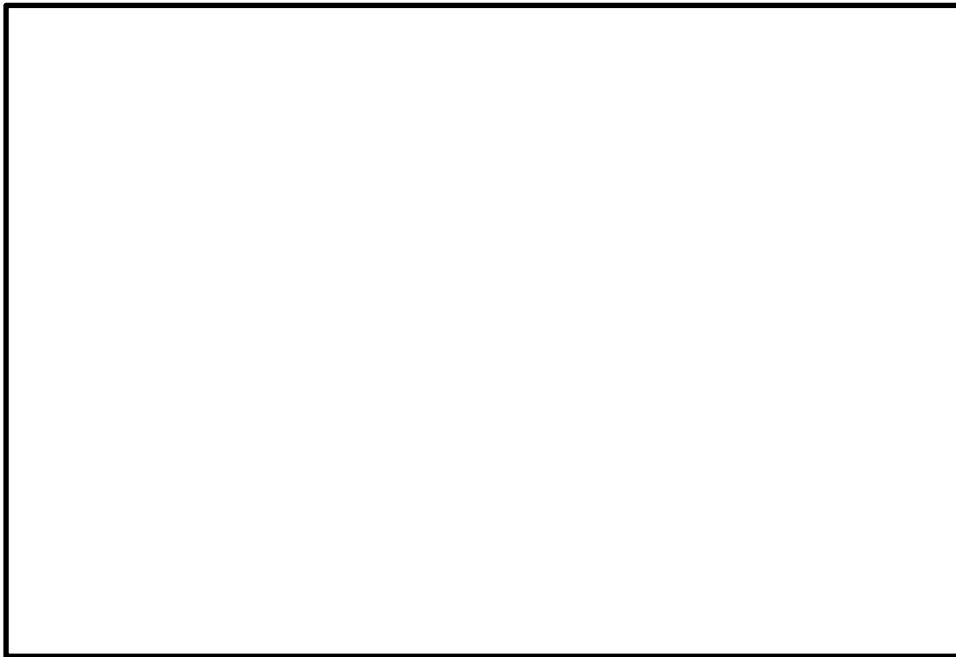


第2.6.1-3図 応力評価点

iii. 貫通部に作用する荷重による応力

貫通部管台取付部の配管反力による応力は、原子炉格納容器本体及び貫通部管台をシェル要素にてモデル化し計算する。

ドライウエルのモデル化の範囲は、作用する荷重を考慮し、構造的に対称となる全体の1/2について考える。下端はドライウエル球形部下端、上端はドライウエル球形部上端とし、両端部は完全拘束とする。解析モデルを第2.6.1-4図及び第2.6.1-5図に示す。



第2.6.1-4図 X-81（ドライウェル換気（排気））貫通部解析モデル



第2.6.1-5図 X-81（ドライウェル換気（排気））貫通部解析モデル（A部詳細）

(c) 評価結果

貫通部管台取付部の各荷重の組合せに対する応力評価を第2.6.1-8表に示す。

第2.6.1-8表 応力評価のまとめ（単位：MPa）

応力 評価点	材料	一次+二次応力	
		応力 振幅	許容* 応力
P1	SPV50 (SPV490相当)	311	501
P2	STS42 (STS410相当)	20	342

*：200℃における値

以上より、貫通部管台取付部及び貫通部管台に生じる応力は、全て許容応力以下である。

(4) 評価結果

貫通配管の疲労評価は疲労累積係数が1以下であり、また貫通部に生じる応力は全て許容応力以下であることから、女川原子力発電所2号炉の貫通配管は200℃、2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

貫通配管の評価対象

本評価においては、X-81（ドライウェル換気（排気））貫通配管を代表評価している。ここでは、評価部位の代表性を示す。

1. 貫通配管の代表選定の考え方

貫通配管に発生する応力は、貫通部の変位と配管系の拘束条件による影響を受ける。貫通部の変位は、熱膨張が主であり、熱膨張を計算する際の固定点（ドライウェル基部）から離れた位置ほど大きくなる。また、配管系の拘束条件による影響は、貫通配管の第一拘束点までの距離が短く、配管口径が大きいほど大きくなる。なお、貫通配管の反力が貫通部に直接伝わらない構造の貫通部については、代表選定対象外とする。

(1) 貫通部の形式による選定

貫通部の形式は以下の3つに区分される。（第2.6.1-1-1図）

形式1：ベローズ付

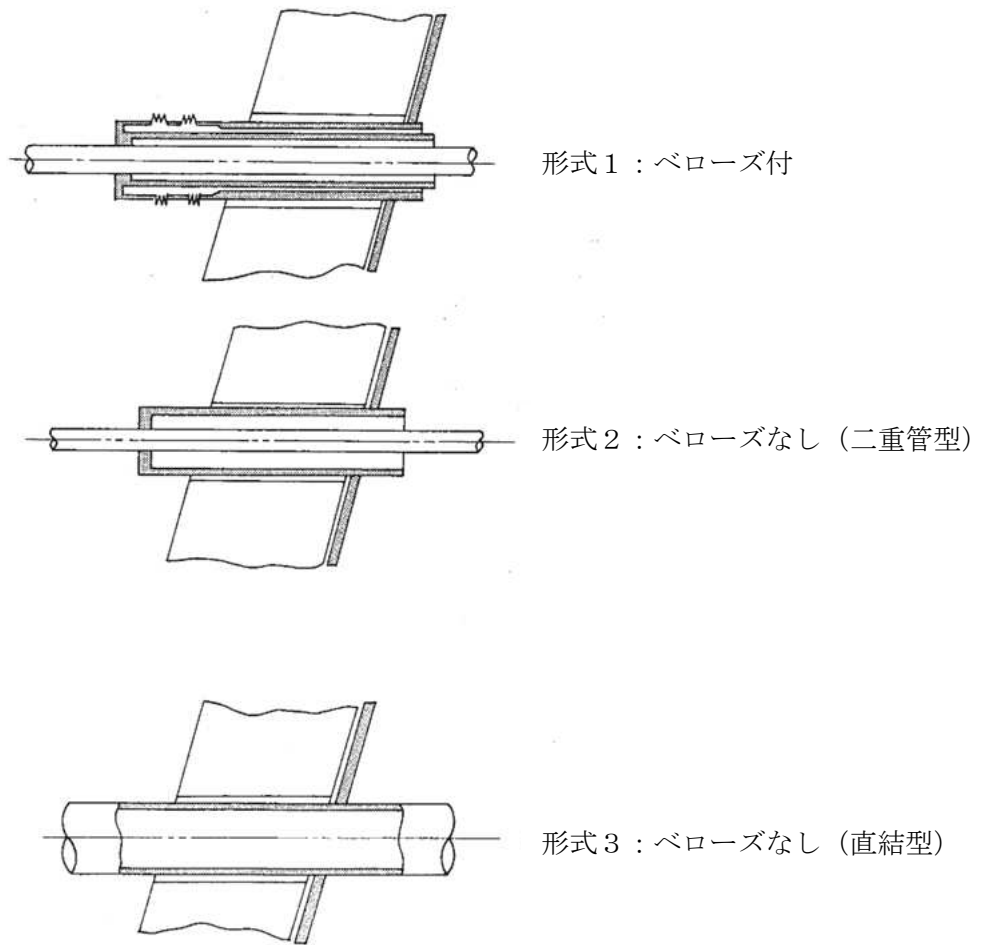
形式2：ベローズなし（二重管型）

形式3：ベローズなし（直結型）

上記のうち、形式1のベローズ付の貫通部は、原子炉格納容器及び貫通配管の変位をベローズで吸収する構造であるため、貫通配管の反力は貫通部に直接伝わらない構造である。

一方、形式2及び形式3の貫通部は、変位による貫通配管の反力が貫通部に負荷され、これによる応力が貫通配管と貫通部に発生する。

このことから、形式2のベローズなし（二重管型）及び形式3のベローズなし（直結型）の貫通部より代表を選定する。



第2.6.1-1-1図 配管貫通部の形式

(2) 貫通配管の変位及び配管口径による選定

貫通部の形式が形式2及び形式3の貫通部について、形式毎に貫通部の設置レベルが最大の貫通部及び貫通配管の呼び径が最大の貫通部を選定する。選定結果を、第2.6.1-1-1表に示す。

第2.6.1-1-1表 貫通部の設置レベル及び貫通配管の呼び径

貫通部形式	貫通部番号	系統・用途	設置 レベル (OP mm)	貫通配管 呼び径 (A)	備考
形式2 ベローズなし (二重管型)	X-71	IA	15,500	50	最高設置レベル
	X-72A	ADS アキュムレータ供給	15,500	50	最高設置レベル
	X-72B	ADS アキュムレータ供給	15,500	50	最高設置レベル
	X-73	SRV アキュムレータ供給	15,500	50	最高設置レベル
	X-22	SLC	15,500	40	
	X-14	PLR サンプリング	12,000	20	
	X-63	HNCW 供給	11,200	200	最大口径
	X-64	HNCW 戻り	11,200	200	最大口径
	X-52	HCW	1,650	65	
	X-13A	PLR ポンプバージ水供給	1,650	20	
X-13B	PLR ポンプバージ水供給	1,650	20		
形式3 ベローズなし (直結型)	X-82A	FCS 吸込	20,900	100	最高設置レベル
	X-82B	FCS 吸込	20,900	100	最高設置レベル
	X-30A	RHR(D/W スプレイ)	19,250	250	
	X-30B	RHR(D/W スプレイ)	19,250	250	
	X-81	ドライウェル換気(排気)	17,800	600	最大口径
	X-70	SA	15,500	50	
	X-20	CRD 挿入	11,840	32	
	X-21	CRD 引抜	11,840	25	
	X-60	MUWC 供給	9,900	50	
	X-80	ドライウェル換気(送気)	3,700	600	
	X-61A	RCW 供給	1,650	150	
	X-61B	RCW 供給	1,650	150	
	X-62A	RCW 戻り	1,650	150	
	X-62B	RCW 戻り	1,650	150	
X-51	LCW	1,650	65		

* 1 : 同一呼び径の貫通部は、設置レベルが高い方を選定する。

* 2 : 同一設置レベルの貫通部は、呼び径が大きい方を選定する。

(3) 配管系の拘束条件による選定

(2)にて選定した貫通部に対し、配管系の拘束条件による影響を考慮する。貫通配管の反力は、貫通配管の第一拘束点までの距離(L)が短く、かつ配管口径(D)が

大きいほど大きくなるため、L/Dが最小の貫通部、すなわち貫通配管の反力が最大となる貫通部を選定する。貫通配管の拘束条件を、第2.6.1-1-2表に示す。

第2.6.1-1-2表 貫通配管の拘束条件

貫通部形式	貫通部番号	系統・用途	貫通配管				PCVからの第一拘束点までの距離 L (mm)	L/D
			呼び径	外径 D (mm)	肉厚 t (mm)	材料		
形式2 ベローズなし (二重管型)	X-63	HNCW 供給	200A	216.30	8.20	STS42 (STS410 相当)		27.78
	X-64	HNCW 戻り	200A	216.30	8.20	STS42 (STS410 相当)		26.45
	X-71	IA	50A	60.50	5.50	SUS316LTP		91.49
	X-72A	ADS アクキュムレータ供給	50A	60.50	5.50	SUS316LTP		119.47
	X-72B	ADS アクキュムレータ供給	50A	60.50	5.50	SUS316LTP		86.63
	X-73	SRV アクキュムレータ供給	50A	60.50	5.50	SUS316LTP		101.40
形式3 ベローズなし (直結型)	X-81	ドライウェル換気 (排気)	600A	609.60	9.50	SM41C (SM400C 相当)		19.90
	X-82A	FCS 吸込	100A	114.30	6.00	STS42 (STS410 相当)		31.72
	X-82B	FCS 吸込	100A	114.30	6.00	STS42 (STS410 相当)		27.67

(4) 貫通配管の評価部位の選定結果

以上より、ドライウェル基部から離れた位置にあり、貫通配管の第一拘束点までの距離が短く、かつ配管口径が大きい貫通配管の反力が最大となるX-81 (ドライウェル換気 (排気)) 貫通配管を代表評価する。

2.6.2 スリーブ

(1) 評価部位

スリーブは、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、原子炉格納容器本体に溶接構造で取り付けられている。

なお、スリーブは、原子炉格納容器内に開口しており内面に圧力を受けるスリーブと、原子炉格納容器内の突出し部が閉止しており外面に圧力を受けるスリーブとに分類される。

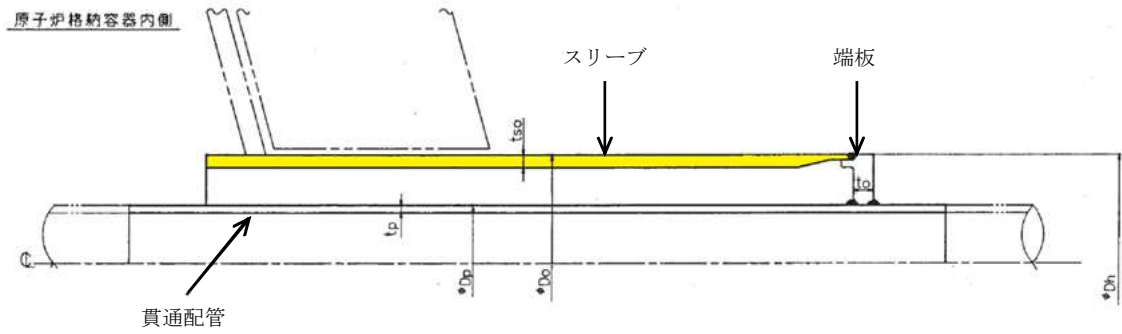
スリーブの機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないことから、脆性破壊及び疲労破壊は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおけるスリーブの放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、内面に圧力を受けるスリーブについては、高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊、外面に圧力を受けるスリーブについては座屈が想定される。

このため、内面に圧力を受けるスリーブについては、延性破壊を評価する。また、外面に圧力を受けるスリーブについては、座屈を評価する。

なお、本評価においては、許容圧力が最小のスリーブとして、内面に圧力を受けるスリーブはX-200A, B、外面に圧力を受けるスリーブはX-151A, Bについて代表記載し、その他については添付2.6.2-1に結果を記載する。

第2.6.2-1図に、代表的なスリーブの構造を示す。



第2.6.2-1図 スリーブの構造

(2) 評価方針

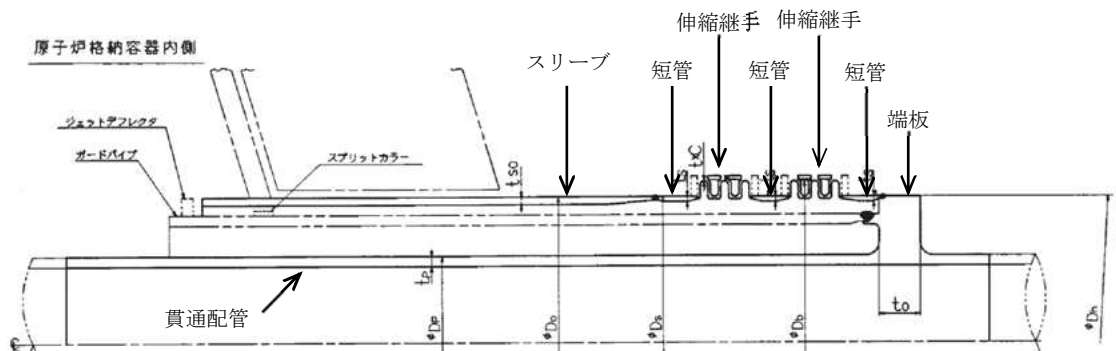
設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200℃におけるスリーブの機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、200℃、2Pdの環境下においてスリーブの放射性物質の閉じ込め機能が維持されることを評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の 2/3 とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器(クラスMC容器)の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である。

(3) 評価

a. スリーブ（内面に圧力を受ける管台）

スリーブ（内面に圧力を受ける管台）の基本形状を第2.6.2-2図に示す。



第2.6.2-2図 スリーブ（内面に圧力を受ける管台）の基本形状

スリーブ（内面に圧力を受ける管台）に対し，設計・建設規格の PVE-3611 を準用し，許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = 2 S \eta t / (D_o - 0.8t)$$

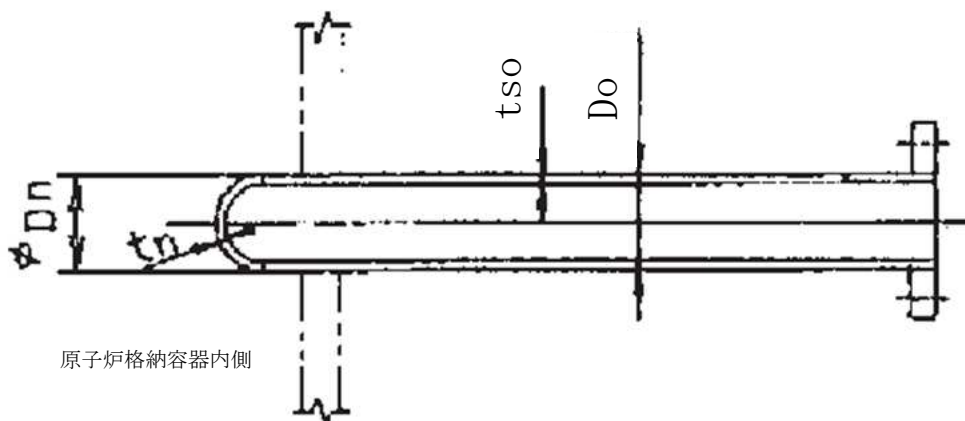
評価の結果，スリーブ（内面に圧力を受ける管台）の許容圧力は約 37.1Pd であり，2Pd 以上である。

以下に，評価結果を示す。

貫通部番号		X-200A, B
材料		SGV49 (SGV480 相当)
最高使用温度 (°C)		200
S (=2/3Su)	許容引張応力 (MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	281
D _o	管台の外径 (mm)	1376.00
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	38.00
P _a	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	15.871
P _d	最高使用圧力 (MPa)	0.427
P _a / P _d	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	37.16

b. スリーブ（外面に圧力を受ける管台）

スリーブ（外面に圧力を受ける管台）の基本形状を第2.6.2-3図に示す。



第2.6.2-3図 スリーブ（外面に圧力を受ける管台）の基本形状

スリーブ（外面に圧力を受ける管台）に対し，設計・建設規格の PVE-3612

を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$Pa = 4tB / 3Do$$

評価の結果、スリーブ（外面に圧力を受ける管台）の許容圧力は約 20.6Pd であり、2Pd 以上である。

以下に、評価結果を示す。

貫通部番号		X-151A, B
材料		STS42 (STS410 相当)
最高使用温度 (°C)		200
S (=2/3Su)	許容引張応力 (MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	269
Do	管台の外径 (mm)	267.40
t	呼び厚さ tso (mm)	15.10
B	付録材料図表 Part7 図3 により求めた値	117.00
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	8.809
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	20.62

(4) 評価結果

スリーブの許容圧力は、内面に圧力を受けるスリーブは約37.1Pd、外面に圧力を受けるスリーブは約20.6Pd以上であることから、女川原子力発電所2号炉のスリーブは200°C、2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

スリーブの評価結果

本評価においては、許容圧力が最小のスリーブとして、内面に圧力を受けるスリーブはX-200A,B、外面に圧力を受けるスリーブはX-151A,Bについて代表記載している。

その他のスリーブ（代表記載対象を含む）の評価結果を、第2.6.2-1-1表に示す。

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（ドライウェル）（1/5）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-5	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-10A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	1066.80	27.367
X-10B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	1066.80	27.367
X-10C	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	1066.80	27.367
X-10D	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	1066.80	27.367
X-11	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-12A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	914.40	32.136
X-12B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	50.00	914.40	32.136
X-13A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-13B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-14	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	12.70	216.30	33.145
X-20	SUS316LTP	200	271	1.00	4.90	42.70	68.484
X-20(予備のみ)	SUS316LTP	200	271	1.00	4.90	42.70	68.484
X-21	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-21(予備のみ)	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-22	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-30A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	15.10	267.40	31.818
X-30B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	15.10	267.40	31.818
X-31A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	660.40	33.898
X-31B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	660.40	33.898
X-31C	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	660.40	33.898
X-32A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	711.20	31.369
X-32B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	711.20	31.369
X-33A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	762.00	29.191
X-33B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	762.00	29.191
X-34	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	660.40	33.898
X-35	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	660.40	33.898

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（ドライウェル）（2/5）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-36	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-37	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-50	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	31.00	609.60	28.519
X-51	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	7.60	89.10	49.251
X-52	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-60	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	7.60	89.10	49.251
X-61A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-61B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-62A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-62B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-63	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-64	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-70	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	7.60	89.10	49.251
X-71	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-72A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-72B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-73	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-80	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	31.00	609.60	28.519
X-81	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	31.00	609.60	28.519
X-82A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-82B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-90	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-91	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-92	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-93	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-100A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-100B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（ドライウェル）（3/5）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-100C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-100D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-101A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-101B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-101C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-101D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	23.80	457.20	29.223
X-102A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-102B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-102C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-102D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-102E	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-103A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-103B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-103C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-104A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-104B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-104C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-104D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-105A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-105B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-105C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-105D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-106A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-106B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-130A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-130B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-130C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（ドライウェル）（4/5）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-130D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-131	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-132A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-132B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-132C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-132D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-133A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-133B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-133C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-133D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-134A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-134B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-134C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-134D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-135A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-135B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-135C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-135D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-136A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-136B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-137A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-137B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-137C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-137D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-138	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-139A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-139B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（ドライウェル）（5/5）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-140A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-140B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-150	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-152A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-152B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-152C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-152D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-153	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-154	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-155	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-160A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.10	48.60	61.631
X-160B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.10	48.60	61.631
X-160C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.10	48.60	61.631
X-160D	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.10	48.60	61.631
X-161	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.10	48.60	61.631
X-190A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-190B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-191A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
X-191B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	21.40	406.40	29.576
ドライウェル計装管台	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
ドライウェル計装管台	SUS316LTP	302	249	1.00	3.90	27.20	80.656
ドライウェル計装管台	SUS316LTP	302	249	1.00	3.90	27.20	80.656
ドライウェル計装管台	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
ドライウェル計装管台 (予備)	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
ドライウェル計装管台 (予備)	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（サブプレッションチェンバ）（1/2）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-200A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	1376.00	15.871
X-200B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	38.00	1376.00	15.871
X-205A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	12.70	216.30	33.145
X-205B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	12.70	216.30	33.145
X-212	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.50	60.50	52.745
X-213A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-213B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-214A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-214B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-214C	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-215A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-215B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-217	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-218	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	15.10	267.40	31.818
X-219	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	26.20	508.00	28.941
X-220	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	15.10	267.40	31.818
X-221	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-222	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-223	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	5.50	60.50	52.745
X-230	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	31.00	609.60	28.519
X-231	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	31.00	609.60	28.519
X-232A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-232B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-233	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-240	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-241	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839
X-242	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	11.00	165.20	37.839

第2.6.2-1-1表 内面に圧力を受けるスリーブ（サブプレッションチェンバ）（2/2）

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	継手効率 η	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-243	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	8.60	114.30	43.072
X-250A	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-250B	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	17.40	318.50	30.735
X-260A	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-260B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-261A	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-261B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-262A	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-262B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-263	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270A	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270C	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270D	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270E	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-270F	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-271A	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-271B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-272A	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-272B	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-272C	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-272D	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-272E	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-272F	SUS316LTP	200	271	1.00	3.90	27.20	87.782
X-280	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
X-281	SUS316LTP	200	271	1.00	4.50	34.00	80.230
ベント管計装管台	SUS316LTP	200	271	1.00	2.20	13.80	99.037

第2.6.2-1-1表 外面に圧力を受けるスリーブ

貫通部番号	スリーブ諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	B (-)	呼び厚さ t_{so} (mm)	外径 D_o (mm)	
X-151A	STS42 (STS410 相当)	200	269	117.00	15.10	267.40	8.809
X-151B	STS42 (STS410 相当)	200	269	117.00	15.10	267.40	8.809

2.6.3 端板

(1) 評価部位

端板は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブに溶接構造で取り付けられている。

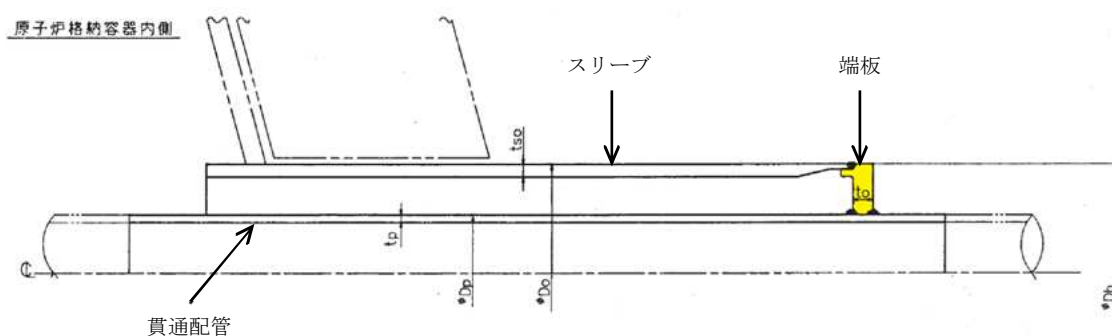
端板の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおける端板の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、端板については、耐圧部材の延性破壊を評価する。

なお、本評価においては、許容圧力が最小の端板 (X-12A, B) について代表記載し、その他については添付2.6.3-1に結果を記載する。

第2.6.3-1図に、端板の構造を示す。



第 2.6.3-1 図 端板の構造

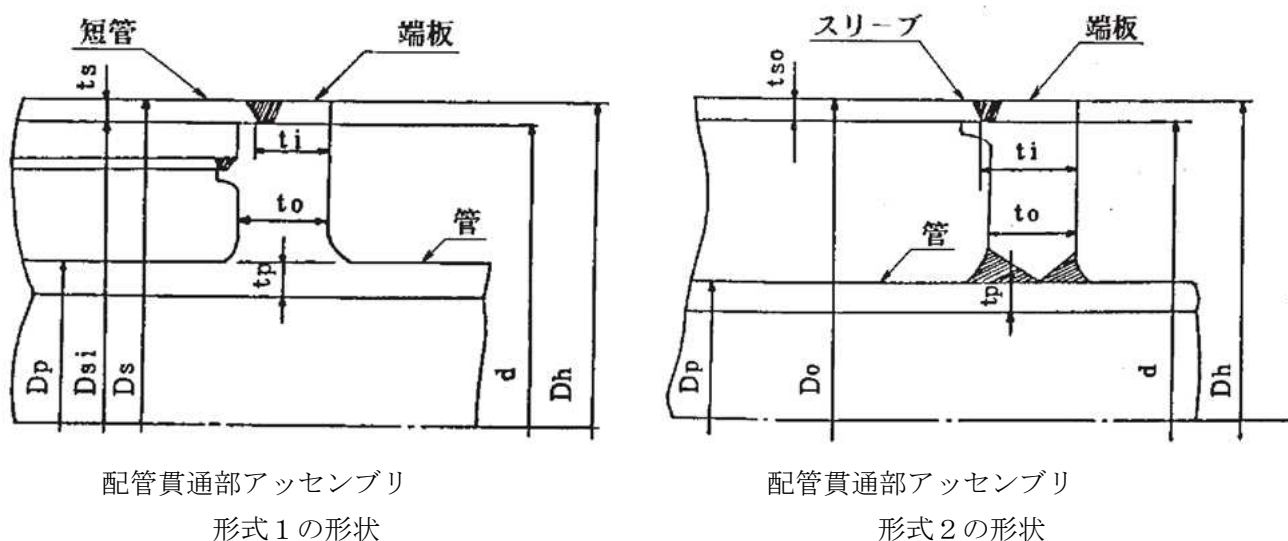
(2) 評価方針

設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200℃における端板の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、200℃、2Pdの環境下において端板の放射性物質の閉じ込め機能が維持されることを評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の2/3とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格のPVE-3111において示される原子炉格納容器（クラスMC容器）の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である。

(3) 評価

端板の基本形状を第2.6.3-2図に示す。



第2.6.3-2図 端板の基本形状

端板に対し、設計・建設規格のPVE-3410項を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = \frac{S}{K} \left(\frac{t}{d} \right)^2$$

評価の結果，端板の許容圧力は約 11.4Pd であり，2Pd 以上である。

以下に，評価結果を示す。

貫通部番号		X-12A, B
材料		SFVC2B
最高使用温度 (°C)		302
S (=2/3Su)	許容引張応力 (MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	292
d	端板 (平板) の径, 又は最小内のり (mm)	875.80
t	呼び厚さ to (mm)	65.00
K	端板 (平板) の取付方法による係数	
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	4.874
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	11.41

(4) 評価結果

端板の許容圧力は約11.4Pd以上であることから，女川原子力発電所2号炉の端板は200°C，2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され，放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

端板の評価結果

本評価においては、許容圧力が最小の端板 (X-12A, B) について代表記載している。

その他の端板 (代表記載対象を含む) の評価結果を、第2.6.3-1-1表に示す。

第2.6.3-1-1表 端板 (形式1)

貫通部番号	端板諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	t _o (mm)	d (mm)	K (係数)	
X-10A	SFVC2B	302	292	80.00	1028.20		5.357
X-10B	SFVC2B	302	292	80.00	1028.20		5.357
X-10C	SFVC2B	302	292	80.00	1028.20		5.357
X-10D	SFVC2B	302	292	80.00	1028.20		5.357
X-11	SFVC2B	302	292	35.00	418.60		6.186
X-12A	SFVC2B	302	292	65.00	875.80		4.874
X-12B	SFVC2B	302	292	65.00	875.80		4.874
X-31A	SFVC2B	302	292	75.00	621.80		12.873
X-31B	SFVC2B	302	292	75.00	621.80		12.873
X-31C	SFVC2B	302	292	75.00	621.80		12.873
X-32A	SFVC2B	302	292	100.00	672.60		19.559
X-32B	SFVC2B	302	292	100.00	672.60		19.559
X-33A	SFVC2B	302	292	95.00	723.40		15.260
X-33B	SFVC2B	302	292	95.00	723.40		15.260
X-34	SFVC2B	302	292	75.00	621.80		12.873
X-35	SFVC2B	302	292	75.00	621.80		12.873
X-36	SFVC2B	302	292	35.00	469.40		4.919
X-37	SFVC2B	302	292	45.00	469.40		8.132
X-50	SFVC2B	302	292	45.00	571.00		5.496

第2.6.3-1-1表 端板（形式2）

貫通部番号	端板諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	t _o (mm)	d (mm)	K (係数)	
X-13A	SUSF316L	302	233	15.00	145.10		7.546
X-13B	SUSF316L	302	233	15.00	145.10		7.546
X-14	SUSF316L	302	233	20.00	192.40		7.629
X-22	SUSF316L	302	233	20.00	145.10		13.414
X-52	SUSF316L	200	254	25.00	145.10		22.849
X-63	SFVC2B	200	292	35.00	422.30		6.078
X-64	SFVC2B	200	292	35.00	422.30		6.078
X-71	SUSF316L	200	254	25.00	145.10		22.849
X-72A	SUSF316L	200	254	25.00	145.10		22.849
X-72B	SUSF316L	200	254	25.00	145.10		22.849
X-73	SUSF316L	200	254	25.00	145.10		22.849

2.6.4 フランジ部

(1) 評価部位

フランジ部（フランジ，ボルト締付平板及び締付ボルト）は，原子炉格納容器の貫通部に溶接固定されたフランジとボルト締付平板を締付ボルトで固定している。フランジとボルト締付平板間は，シール溝が二重に配置されており，それぞれにガスケットを挟み込みシールしている。

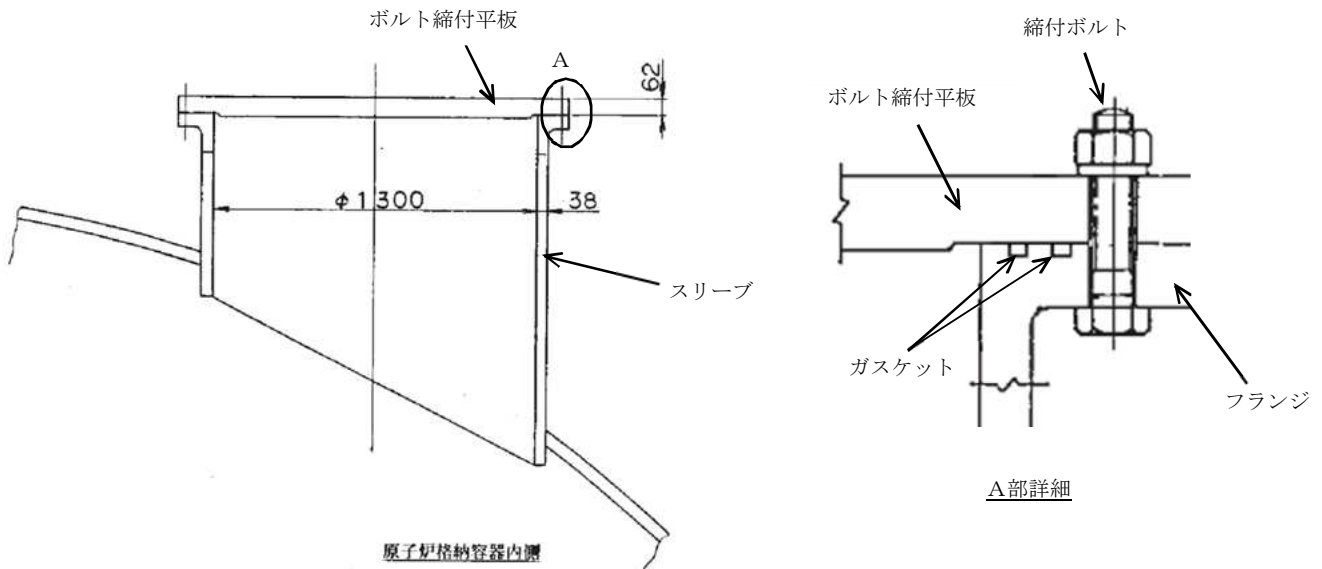
フランジ部の機能喪失要因として，脆性破壊，疲労破壊，座屈及び延性破壊が考えられるが，評価条件200℃，2Pdにおいては，脆性破壊が生じる温度域でないこと，繰返し荷重が作用しないこと，圧縮力がに生じないことから，脆性破壊，疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

シール部は，内圧の上昇に伴いフランジ開口量が増加することによる漏えい，フランジ開口の進展による締付ボルトの破損が想定される。また，シール材が重大事故時の環境に晒されることにより劣化（復元量の低下）し，シール能力が低下することが想定される。

このため，フランジ部について，フランジ，ボルト締付平板及び締付ボルトの延性破壊，また，シール能力低下による漏えいを評価する。なお，シール材については，改良EPDM材ガスケットに取り替える予定であることから，改良EPDM材ガスケットでの評価を実施する。

なお，本評価においては，フランジ部の径と板厚等の組み合わせにより，厳しい条件となるX-200A, Bのフランジ部を選定し評価を行う。（添付2.6.4-1）

第2.6.4-1図に，フランジ部の構造を示す。



第 2.6.4-1 図 フランジ部の構造

(2) 評価方針

フランジ部を構成するフランジ、ボルト締付平板及び締付ボルトのうち、ボルト締付平板については、設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200℃におけるボルト締付平板の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、2Pd以上であることを確認する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の 2/3 とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器（クラス MC 容器）の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方である。

フランジ及び締付ボルトについては、JIS B 8265-2003を適用し、2Pdにおけるフランジの発生応力が許容応力を下回ること、200℃、2Pdにおける締付ボルトの所要総断面積が実際のボルト総断面積以下であることを確認する。

シール部については、一般式を用いて、200℃、2Pdにおけるフランジ部の開口量を評価し、許容開口量を下回ることを確認する。

フランジ部の評価対象と評価方法を第2.6.4-1表に示す。

第 2.6.4-1 表 フランジ部の評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
ボルト締付平板	延性破壊	・設計・建設規格 (PVE-3410) の評価式を準用し, 200℃における 2/3Su が発生するときの許容圧力を評価
フランジ	延性破壊	・ JIS B 8265-2003 を適用し, 2Pd におけるフランジの発生応力を評価
締付ボルト	延性破壊	・ JIS B 8265-2003 を適用し, 200℃, 2Pd におけるボルトの所要総断面積を評価
シール部	開口, シール能力低下	・改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を踏まえ, 一般式を用いてフランジの開口量を評価

(3) 評価

a. ボルト締付平板の評価

ボルト締付平板に対し, 設計・建設規格の PVE-3410 を準用し, 許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = \frac{S}{K} \left(\frac{t}{d} \right)^2$$

評価の結果, ボルト締付平板の許容圧力は約 Pd であり, 2Pd 以上である。

以下に, 評価結果を示す。

貫通部番号		X-200A, B
材料		SGV49 (SGV480 相当)
最高使用温度 (°C)		200
S (=2/3Su)	設計引張強さ (MPa) ここでは, 2/3Su を用いて算出する	281
d	平板の径, 又は最小内のり (mm)	1353.00
t	呼び厚さ t_0 (mm)	62.00
K	平板の取付方法による係数	
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	

b. フランジの評価

フランジに対し, JIS B 8265-2003 を適用した評価を行う。

評価の結果, フランジの各部の発生応力は許容応力以下である。

評価結果を, 第 2.6.4-2 表に示す。

第 2.6.4-2 表 フランジ応力評価結果 (X-200A, B)

発生応力 (MPa)			許容応力 (MPa)
軸方向ハブ応力	σ_H		438
内径におけるフランジの 半径方向応力	σ_R		292
内径におけるフランジの 周方向応力	σ_T		292
組合せ応力	$(\sigma_H + \sigma_R)/2$		292
	$(\sigma_H + \sigma_T)/2$		292

c. 締付ボルトの評価

締付ボルトに対し，JIS B 8265-2003 を適用した評価を行う。

評価の結果，締付ボルトの所要総断面積は実際のボルト総断面積以下である。

以下に，評価結果を示す。

第 2.6.4-3 表 ボルト評価結果 (X-200A, B)

ボルトの所要総断面積 A_m (mm ²)	
実際のボルト総断面積 A_b (mm ²)	

d. シール部の評価

シール部に対し，一般式を用いて 2Pd における開口量を算出し，許容開口量を下回ることを確認する。なお，シール材については，改良 EPDM 材ガスケットに取り替える予定であるため，改良 EPDM 材ガスケットを使用した場合の評価を行う。

許容開口量の設定に使用する改良 EPDM 材の圧縮永久ひずみ試験結果を第 2.6.4-4 表に示す。

第 2.6.4-4 表 圧縮永久ひずみ試験*1 結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input style="width: 40px; height: 20px;" type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input style="width: 40px; height: 20px;" type="text"/> %*2

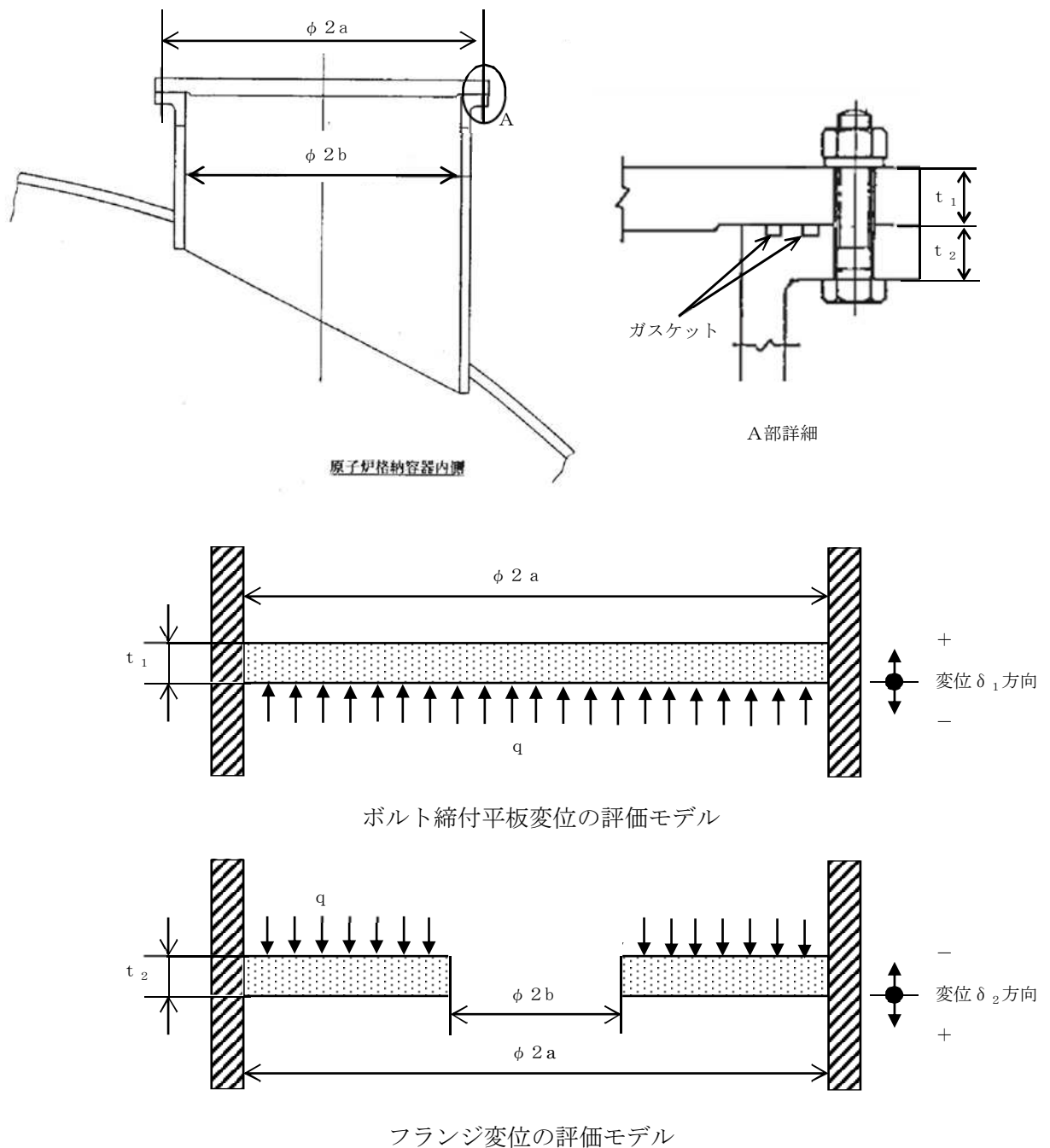
*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3 試験片の平均値 (% , % , %)

許容開口量は、168時間のひずみ率 \square % とフランジ部の定格押込量 \square mm を踏まえ、 \square mm (= 定格押込量 \square mm \times (100% - \square %)) とする。

評価の結果、シール部については、フランジ部の開口量は約 \square mm であり、許容開口量 \square mm 以下である。

以下に、フランジ部開口量の評価モデルを第 2.6.4-2 図に、評価結果を第 2.6.4-5 表を示す。



第 2.6.4-2 図 評価モデル

第 2.6.4-5 表 フランジ部開口量の評価結果 (X-200A, B)

a	ボルトピッチ円半径	
b	フランジ内半径	
D_1	$= \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)}$ *1	
D_2	$= \frac{Et_2^3}{12(1-\nu^2)}$ *1	
E	縦弾性係数	
K_{yb}	b/a より定まる係数 *1	
q	評価圧力	
t_1	閉止板板厚	
t_2	フランジ部板厚	
ν	ポアソン比	
δ_1	$= \frac{qa^4}{64D_1}$ *1*2	
δ_2	$= \frac{-K_{yb} \cdot qa^4}{D_2}$ *1*2	
$\delta_1 + \delta_2$	合計開口量	
δ_a	許容開口量	

*1 : 出典「ROARK' S FORMULAS FOR STRESS AND STRAIN EIGHTH EDITION」

*2 : 評価モデルにおける最大変位をシール部の変位量とする。

(4) 評価結果

ボルト締付平板の許容圧力は約 Pd 以上であり、フランジの発生組合せ応力は、最大 MPa であり許容応力 (292MPa) 以下である。また、締付ボルトの所要総断面積は実際のボルト総断面積以下である。また、シール部については、フランジ部の開口量は約 mm であり、許容開口量 mm 以下であることから、女川原子力発電所2号炉のフランジ部は200℃、2Pdにおいて耐圧部材及びシール材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

フランジ部の評価対象

本評価においては、フランジ部の径と板厚等の組み合わせにより、厳しい条件となるX-200A, Bのフランジ部を選定し評価している。

ボルト締付フランジを有する貫通部には、X-5, X-160A～D, X-161, X-200A, Bがあるが、このうちX-160A～D, X-161については、配管をフランジ接続しており、平板がない構造である。

ボルト締付平板の許容応力は、ボルト締付平板の径が大きく、板厚が薄い方が小さくなるため、ボルト締付平板の径(d)と板厚(t)の比(d/t)が大きいX-200A, Bのフランジ部を選定し評価を行った。

第2.6.4-1-1表に、ボルト締付平板の諸元を示す。

第2.6.4-1-1表 ボルト締付平板諸元

貫通部番号	ボルト締付平板諸元						
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	d (mm)	t (mm)	K (係数)	d/t
X-5	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	324.00	30.00		10.80
X-200A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1353.00	62.00		21.82
X-200B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1353.00	62.00		21.82

2.6.5 閉止板

(1) 評価部位

閉止板は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブに溶接構造で取り付けられている。

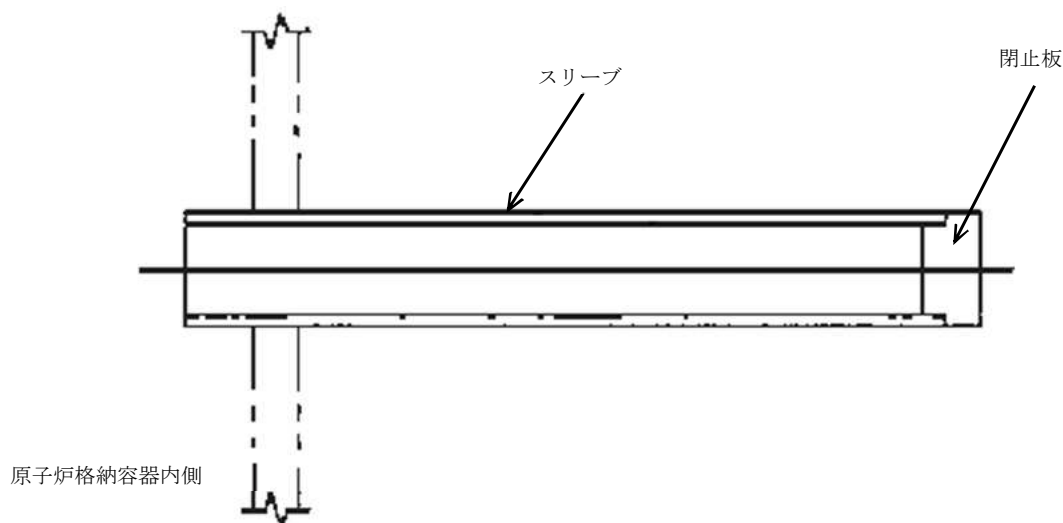
閉止板の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおける閉止板の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、閉止板については、耐圧部材の延性破壊を評価する。

なお、本評価においては、許容圧力が最小の閉止板（X-130A*）について代表記載し、その他については添付2.6.5-1に結果を記載する。（*：同一形状の閉止板が複数存在）

第2.6.5-1図に、閉止板の構造を示す。



第2.6.5-1図 閉止板の構造

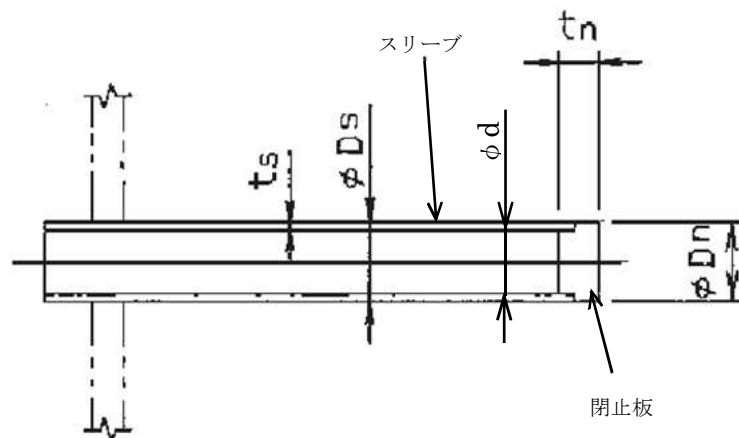
(2) 評価方針

設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200℃における閉止板の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、200℃、2Pdの環境下において閉止板の放射性物質の閉じ込め機能が維持されることを評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の2/3とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格のPVE-3111において示される原子炉格納容器（クラスMC容器）の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である。

(3) 評価

閉止板の基本形状を第2.6.5-2図に示す。



第2.6.5-2図 閉止板の基本形状

閉止板に対し、設計・建設規格のPVE-3410を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = \frac{S}{K} \left(\frac{t}{d} \right)^2$$

評価の結果、閉止板の許容圧力は約10.8Pdであり、2Pd以上である。

以下に、評価結果を示す。

貫通部番号		X-130A*
材料		SUS316L
最高使用温度 (°C)		302
S (=2/3Su)	許容引張応力(MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	249
d	閉止板 (平板) の径, 又は最小内のり (mm)	382.40
t	呼び厚さ t_n (mm)	30.00
K	閉止板 (平板) の取付方法による係数	
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	4.644
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	10.87

* : 同一形状の貫通部 (閉止板) が複数存在

(4) 評価結果

閉止板の許容圧力は約10.8Pd以上であることから、女川原子力発電所2号炉の閉止板は200°C、2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

閉止板の評価結果

本評価においては、許容圧力が最小の閉止板（X-130A）について代表記載している。

その他の閉止板（代表記載対象を含む）の評価結果を、第2.6.5-1-1表に示す。

第2.6.5-1-1表 閉止板（ドライウエル）（1/2）

貫通部番号	閉止板諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	d (mm)	t _n (mm)	K (係数)	
X-20(予備)	SUSF316L	200	254	43.20	30.00		371.189
X-21(予備)	SUSF316L	200	254	34.50	30.00		582.001
X-90(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
X-91(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
X-92(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	294.50	30.00		8.836
X-93(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	294.50	30.00		8.836
X-106A(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	294.50	30.00		8.836
X-106B(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	294.50	30.00		8.836
X-130A	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-130B	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-130C	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-130D	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-131	SUSF316L	302	233	99.00	30.00		64.836
X-132A	SUSF316L	302	233	99.00	30.00		64.836
X-132B	SUSF316L	302	233	99.00	30.00		64.836
X-132C	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-132D	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-133A	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-133B	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-133C	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-133D	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-134A	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-134B	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-134C	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-134D	SUSF316L	302	233	99.00	30.00	64.836	
X-135A	SUS316L	302	249	382.40	30.00	4.644	
X-135B	SUS316L	302	249	382.40	30.00	4.644	

第 2.6.5-1-1 表 閉止板（ドライウエル）（2/2）

貫通部番号	閉止板諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	d (mm)	t _n (mm)	K (係数)	
X-135C	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-135D	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-136A	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-136B	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-137A	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-137B	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-137C	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-137D	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-138	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-139A	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-139B	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-140A	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-140B	SUS316L	302	249	382.40	30.00		4.644
X-150	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-152A	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-152B	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-152C	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-152D	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-153	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-154	SUSF316L	302	233	99.00	30.00		64.836
X-155	SUS316L	200	271	294.50	30.00		8.522
X-190A(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
X-190B(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
X-191A(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
X-191B(予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	382.40	30.00		5.241
ドライウエル計装管台 (予備)	SUSF316L	200	254	19.40	30.00		1840.597
ドライウエル計装管台 (予備)	SUSF316L	200	254	25.00	30.00		1108.364

第2.6.5-1-1表 閉止板 (サブレーションチェンバ)

貫通部番号	閉止板諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S(2/3Su) (MPa)	d (mm)	t _n (mm)	K (係数)	
X-204	SUSF316L	200	254	50.60	16.00		76.959
X-205A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	193.00	30.00		20.574
X-205B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	193.00	30.00		20.574
X-240 (予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	99.00	30.00		78.192
X-241 (予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	145.70	30.00		36.101
X-242 (予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	145.70	30.00		36.101
X-243 (予備)	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	99.00	30.00		78.192
X-281 (予備)	SUSF316L	200	254	25.00	30.00		1108.364

2.6.6 伸縮継手

(1) 評価部位

伸縮継手は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、短管に溶接構造で取り付けられている。

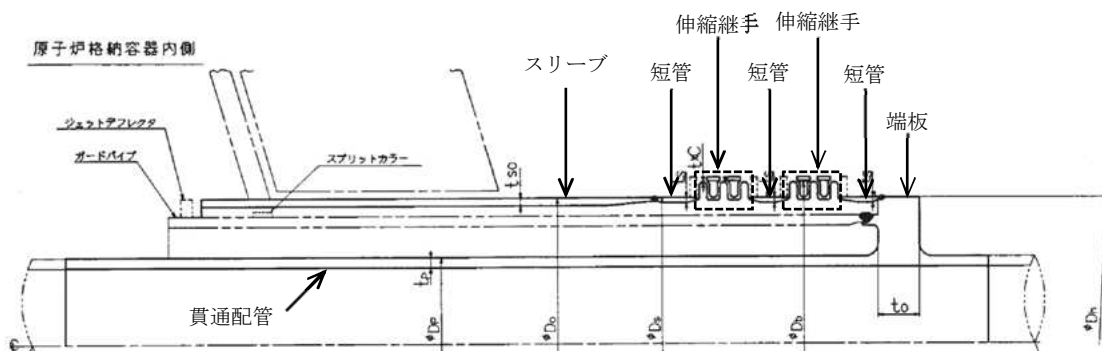
伸縮継手の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないことから、脆性破壊は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおける伸縮継手の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、通常運転時の繰返し荷重に加えて重大事故時の繰返し荷重が作用することに伴う耐圧部材の疲労破壊が想定される。

このため、伸縮継手について、既工認と同様の評価式を用いて重大事故時の伸縮継手の疲労累積係数を求め、通常運転時の疲労累積係数との合計が1以下であることを確認することで、疲労破壊を評価する。

なお、評価は、重大事故時の疲労累積係数と通常運転時の疲労累積係数との合計が最も大きい貫通部(X-36)の伸縮継手を代表記載し、その他については添付2.6.6-1に結果を記載する。

第2.6.6-1図に、伸縮継手の構造を示す。



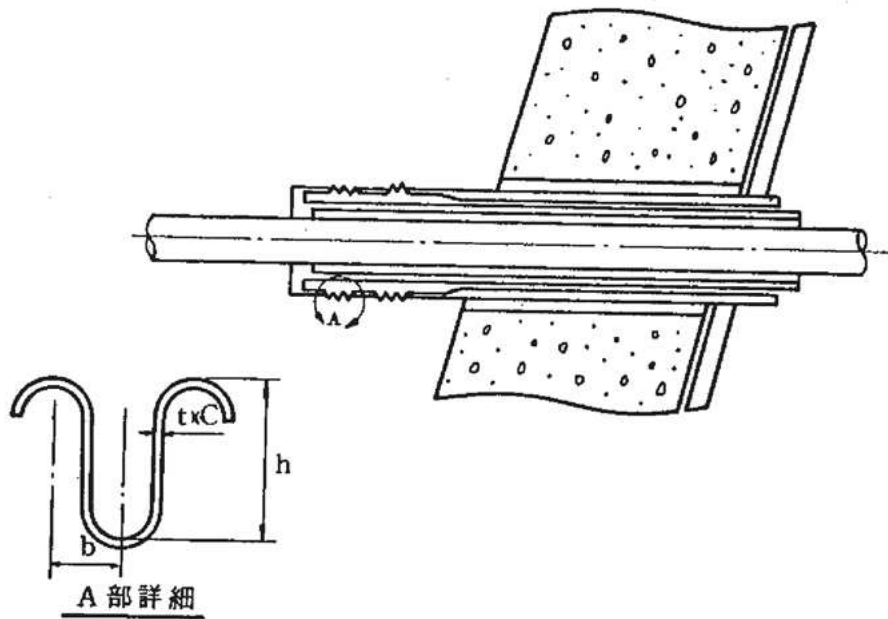
第2.6.6-1図 伸縮継手の構造

(2) 評価方針

設計・建設規格に準拠した評価を用いて、通常運転時と200℃における伸縮継手の疲労累積係数を算出し、200℃、2Pdの環境下において伸縮継手の放射性物質の閉じ込め機能が維持されていることを評価する。

(3) 評価

伸縮継手の基本形状を第2.6.6-2図に示す。



第2.6.6-2図 伸縮継手の基本形状

伸縮継手に対して、設計・建設規格のPVE-3810に準拠し、重大事故時の設計繰返し回数と許容繰返し回数の比である疲労累積係数を次の式で求め、既工認における通常運転時の疲労累積係数との合計が1以下であることを確認する。重大事故時の条件として、事故の繰返し回数は1回とする。また、重大事故時は200℃、2Pdとなるため、伸縮継手の全伸縮量は設計状態（171℃、1Pd）の2倍とする。

$$N_{S_i} = \left(\frac{11031}{\sigma} \right)^{3.5}$$

$$\sigma = \frac{1.5Et \delta}{n\sqrt{bh^3}} + \frac{Ph}{tc}$$

評価の結果，伸縮継手の重大事故時の疲労累積係数と通常運転時の疲労累積係数との合計は0.1067であり，1 以下である。

以下に，評価結果を示す。

貫通部番号		X-36
材料		SUS316L
最高使用温度 (°C)		200
E	縦弾性係数 (MPa)	183000
t	ベローズの板厚 (mm)	1.0
δ	全伸縮量 (mm) (既工認における設計状態の2倍)	194.4
h	ベローズの波の高さ (mm)	
n	ベローズの波数の2倍の値 (-)	
b	ベローズの波のピッチの2分の1 (mm)	
c	ベローズの層数 (-)	
P	限界圧力 (MPa)	0.854
σ	ベローズに生じる応力 (MPa)	2039
N _{S3}	許容繰返し回数 (回)	368
N ₃	設計繰返し回数 (回)	1
N ₁ /N _{S1} +N ₂ /N _{S2}	既工認における疲労累積係数 (-)	0.104
N ₃ /N _{S3}	重大事故時の疲労係数 (-)	0.0027
ΣN _i /N _{Si}	疲労累積係数 (-)	0.1067

(4) 評価結果

伸縮継手の重大事故時の疲労累積係数と通常運転時の疲労累積係数との合計は 0.1067 で 1 以下であることから、女川原子力発電所 2 号炉の伸縮継手は 200℃、2Pd において耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

伸縮継手の評価結果

伸縮継手については、重大事故時の疲労累積係数と通常運転時の疲労累積係数との合計が最も大きい貫通部(X-36)の伸縮継手を代表記載している。

その他の伸縮継手（代表記載対象を含む）の評価結果を、第2.6.6-1-1表に示す。

第2.6.6-1-1表 伸縮継手の評価結果

貫通部番号	材料	通常運転時の 疲労累計係数	重大事故時の 疲労累計係数	疲労累計 係数の合計
X-10A	SUS316L	0.0633	0.0015	0.0648
X-10B	SUS316L	0.0633	0.0015	0.0648
X-10C	SUS316L	0.0633	0.0015	0.0648
X-10D	SUS316L	0.0633	0.0015	0.0648
X-11	SUS316L	0.0860	0.0019	0.0879
X-12A	SUS316L	0.0310	0.0008	0.0318
X-12B	SUS316L	0.0310	0.0008	0.0318
X-31A	SUS316L	0.0321	0.0010	0.0331
X-31B	SUS316L	0.0321	0.0010	0.0331
X-31C	SUS316L	0.0321	0.0010	0.0331
X-32A	SUS316L	0.0169	0.0004	0.0173
X-32B	SUS316L	0.0169	0.0004	0.0173
X-33A	SUS316L	0.0192	0.0004	0.0196
X-33B	SUS316L	0.0192	0.0004	0.0196
X-34	SUS316L	0.0218	0.0007	0.0225
X-35	SUS316L	0.0212	0.0006	0.0218
X-36	SUS316L	0.104	0.0027	0.1067
X-37	SUS316L	0.0754	0.0022	0.0776
X-50	SUS316L	0.0369	0.0006	0.0375

2.6.7 短管

(1) 評価部位

短管は、原子炉格納容器本体に配管等を接続するために設けた部材であり、スリーブと伸縮継手間、伸縮継手と端板間に溶接構造で取り付けられている。

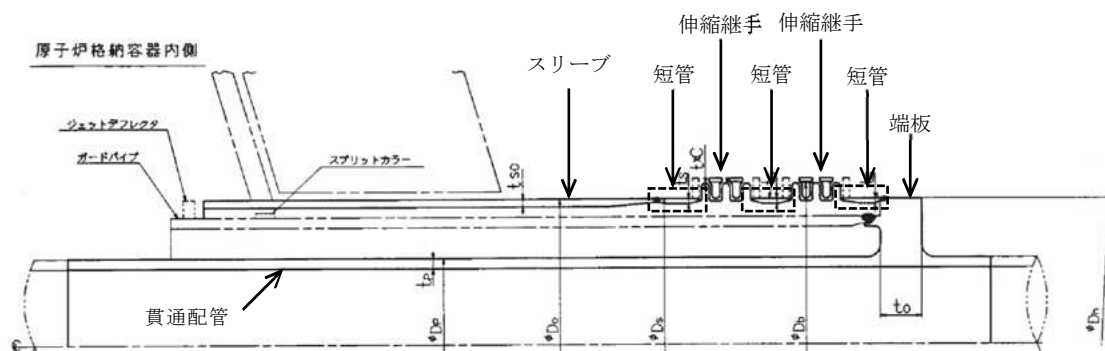
短管の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおける短管の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けたことによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、短管については、耐圧部材の延性破壊を評価する。

なお、本評価においては、許容圧力が最小の短管（X-10A*）について代表記載し、その他については添付2.6.7-1に結果を記載する。（*：同一形状の短管が複数存在）

第2.6.7-1図に、短管の構造を示す。



第 2.6.7-1 図 短管の構造

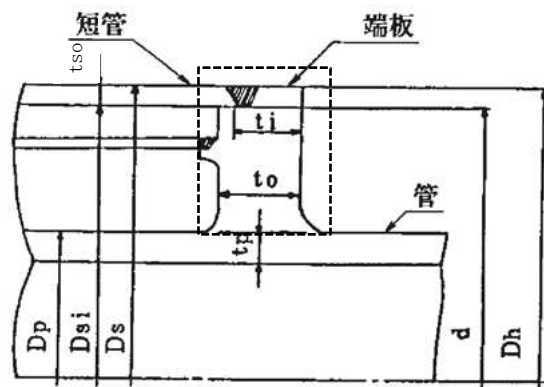
(2) 評価方針

設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200℃における短管の機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、200℃、2Pdの環境下において短管の放射性物質の閉じ込め機能が維持されることを評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の2/3とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格のPVE-3111において示される原子炉格納容器（クラスMC容器）の供用状態Dに対する許容値と同じ考え方である。

(3) 評価

短管の基本形状を第2.6.7-2図に示す。



第 2.6.7-2 図 短管の基本形状

短管に対し、設計・建設規格のPVE-3611を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = 2 S \eta t / (D_o - 0.8t)$$

評価の結果、短管の許容圧力は約25.0Pdであり、2Pd以上である。

以下に、評価結果を示す。

貫通部番号		X-10A*
材料		SGV49 (SGV480 相当)
最高使用温度 (°C)		200
S (=2/3Su)	許容引張応力 (MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	281
Do	短管の外径 D _s (mm)	1066.80
η	継手効率 (-)	1.00
t	呼び厚さ t _{so} (mm)	20.00
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	10.697
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	25.05

* : 同一形状の短管が複数存在

(4) 評価結果

短管の許容圧力は約25.0Pd以上であることから、女川原子力発電所2号炉の短管は200°C、2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

短管の評価結果

本評価においては、許容圧力が最小の短管（X-10A）について代表記載している。

その他の短管（代表記載対象を含む）の評価結果を、第2.6.7-1-1表に示す。

第 2.6.7-1-1 表 短管

貫通部番号	短管諸元						許容圧力 Pa (MPa)
	材料	使用温度 (°C)	S (2/3Su) (MPa)	η	呼び厚さ t_{so} (mm)	D_s (mm)	
X-10A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	1066.80	10.697
X-10B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	1066.80	10.697
X-10C	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	1066.80	10.697
X-10D	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	1066.80	10.697
X-11	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	20.00	457.20	24.388
X-12A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	914.40	12.511
X-12B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	914.40	12.511
X-31A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	660.40	17.443
X-31B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	660.40	17.443
X-31C	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	660.40	17.443
X-32A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	711.20	16.168
X-32B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	711.20	16.168
X-33A	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	762.00	15.067
X-33B	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	762.00	15.067
X-34	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	660.40	17.443
X-35	SGV49 (SGV480 相当)	200	281	1.00	20.00	660.40	17.443
X-36	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	20.00	508.00	21.870
X-37	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	20.00	508.00	21.870
X-50	STS42 (STS410 相当)	200	269	1.00	20.00	609.60	18.127

2.7 電気配線貫通部

(1) 評価部位

電気配線貫通部には高電圧用と低電圧用の二種類があり、電気配線貫通部本体のヘッドに高電圧用又は低電圧用のモジュールが設置されている。

電気配線貫通部(高電圧)は、スリーブ～アダプタ～ヘッド～モジュール間の溶接部、モジュール内部のエチレンプロピレンゴムにより気密性を維持する構造となっている。

また、電気配線貫通部(低電圧)は、スリーブ～アダプタ間、アダプタ～ヘッド間の溶接、ヘッド～モジュール間のメタルOリングによる金属シールと、モジュール内部のエポキシ樹脂により気密性を維持する構造となっている。

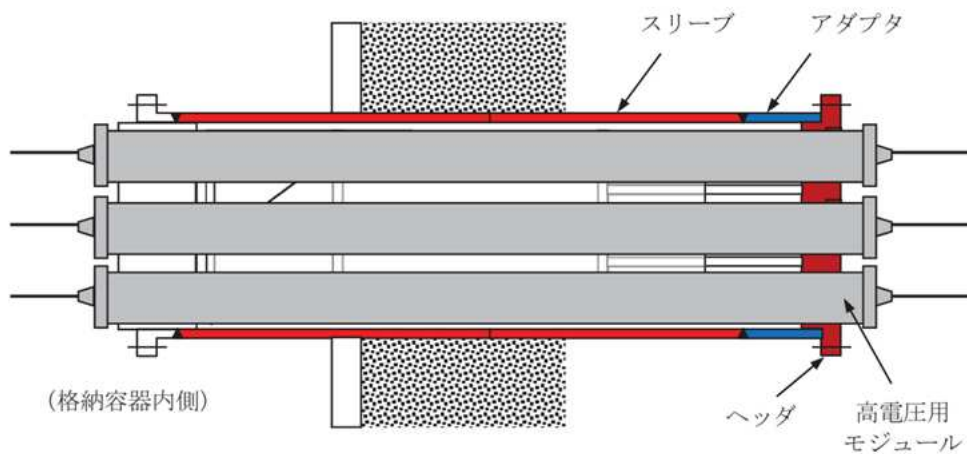
電気配線貫通部のうち、200℃、2Pd の環境下におけるアダプタ及びヘッドの機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられるが、今回の評価条件である、200℃、2Pd の条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力がアダプタ及びヘッドに生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。従って高温状態で内圧を受け、過度な塑性変形に伴う延性破壊が想定される。

このため、アダプタ及びヘッドについては延性破壊を評価する。

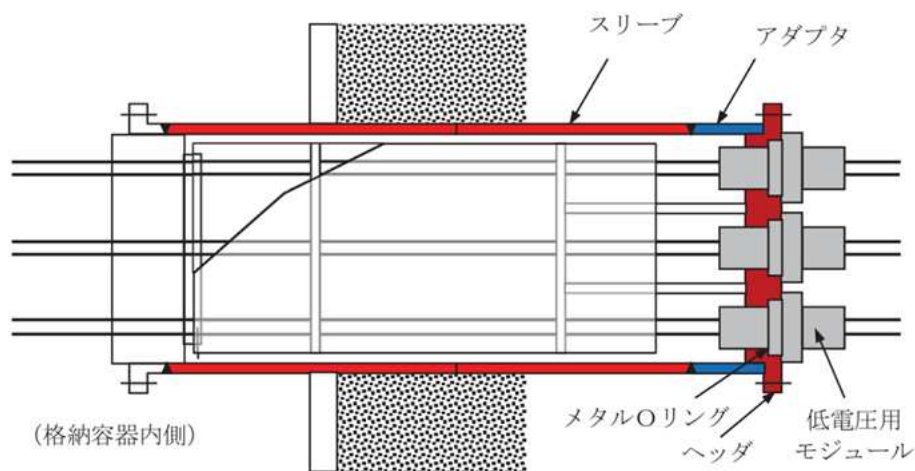
また、モジュールについては、原子炉格納容器との取り合い部（電気配線貫通部のスリーブ）からモジュール部を支持するヘッド部までは距離があり、原子炉格納容器胴の変形に伴う影響はないと考えられることから、原子炉格納容器内の圧力及び温度の上昇に伴うエチレンプロピレンゴム、エポキシ樹脂の劣化のためのシール能力低下による漏えいを評価する。

なお、電気配線貫通部におけるスリーブについては、「2.6.2 スリーブ」の中で評価している。

電気配線貫通部（高電圧）の構造を第2.7-1図に、電気配線貫通部（低電圧）の構造を第2.7-2図に示す。



第 2.7-1 図 電気配線貫通部（高電圧）の構造



第 2.7-2 図 電気配線貫通部（低電圧）の構造

(2) 評価方針

アダプタ及びヘッダについては、設計・建設規格を準用した評価式を用いて、200°Cにおけるアダプタ及びヘッダの機能が維持される最大の負荷圧力（許容圧力）を算出し、200°C、2Pdの環境下においてアダプタ及びヘッダの放射性物質の閉じ込め機能が維持されることを評価する。

その際、部材に発生する応力強さの許容値は、今回の評価が設計基準を超えた限界温度、圧力の評価であることを踏まえ、設計引張強さ（Su）の 2/3 とする。この許容値の考え方は、設計・建設規格の PVE-3111 において示される原子炉格納容器（クラス MC 容器）の供用状態 D に対する許容値と同じ考え方である。

モジュールについては、既往の電共研において、実機モジュールと同等の試

験体を用い、原子炉格納容器内側の電気配線貫通部端子箱部分の環境条件を200℃、約1.87Pd(0.8MPa)とした環境下におけるモジュールのエチレンプロピレンゴム、エポキシ樹脂の気密性が確認されている。

平成2年度から平成14年度に実施されたNUPEC 重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）において、モジュールと同等の試験体を用い、シール材からの漏えい限界圧力・温度の把握を行っている。この評価では、最大2.3Pd（1MPa）、約260℃までの耐漏えい性が確認されており、また、気密性は圧力に依存することなく温度により影響を受けることが確認されている。

また、過去の環境試験において、モジュール部と同等の試験体を用い、冷却材喪失事故時を模擬した環境条件（）におけるモジュール部のエチレンプロピレンゴム、エポキシ樹脂の気密性が確認されている。

これらの評価結果を用いて、200℃、2Pdの環境下においてモジュールの気密性が確保されることを確認する。

電気配線貫通部の評価対象と評価方法を第2.7-1表に示す。

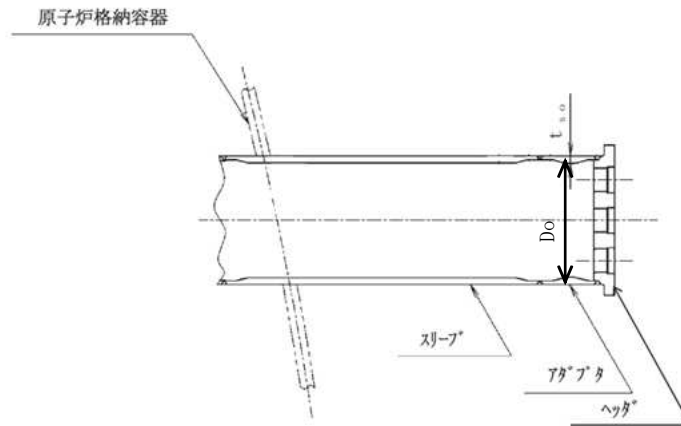
第2.7-1表 電気配線貫通部の評価対象と評価方法

評価対象	機能喪失要因	評価方法
スリーブ	延性破壊	・「配管貫通部 スリーブ」に合わせて評価
アダプタ	延性破壊	・設計・建設規格(PVE-3611)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価
ヘッド	延性破壊	・設計・建設規格(PVE-3410)を準用し、200℃における2/3Suが発生するときの許容圧力を評価
モジュール	変形, シール能力低下	・電共研、NUPEC 及び過去の環境試験結果の原子炉格納容器電気ペネトレーションの特性・健全性確認試験結果を用いて、シール性が確保されることを評価

(3) 評価

a. アダプタの評価

アダプタの基本形状を第2.7-3図に示す。



第2.7-3図 アダプタの基本形状

アダプタに対し、設計・建設規格のPVE-3611を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = 2S \eta t / (D_o - 0.8t)$$

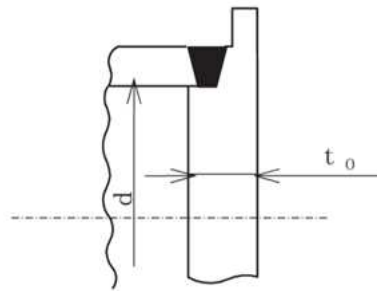
評価の結果、アダプタ（高電圧）の許容圧力は約30.4Pd、アダプタ（低電圧）の許容圧力は約37.0Pdであり、2Pd以上である。

以下に、評価結果を示す。

電気配線貫通部の型式		高電圧	低電圧
材料			
最高使用温度 (°C)		200	200
S (=2/3Su)	許容引張応力(MPa) (最高使用温度での2/3Suを用いて算出)	269	269
Do	アダプタの外径 (mm)		
η	継手効率 (-)	1.00	1.00
t	呼び厚さ tso (mm)		
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	13.015	15.819
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	30.47	37.04

b. ヘッダの評価

ヘッダの基本形状を第2.7-4図に示す。



第2.7-4図 ヘッダの基本形状

ヘッダに対し、設計・建設規格のPVE-3410を準用し、許容圧力を次の式で評価する。

$$P_a = \frac{S}{K} \left(\frac{t}{d} \right)^2$$

評価の結果、ヘッダ（高電圧）の許容圧力は約33.7Pd、ヘッダ（低電圧）の許容圧力は約69.0Pdであり、2Pd以上である。

以下に、評価結果を示す。

電気配線貫通部の型式		高電圧	低電圧
材料			
最高使用温度 (°C)		200	200
S (=2/3Su)	許容引張応力 (MPa) (最高使用温度での 2/3Su を用いて算出)	268	268
d	ヘッダの呼び径 (mm)		
t	呼び厚さ to (mm)		
K	ヘッダの取付方法による係数	0.33	0.33
Pa	200°Cにおける許容圧力 (MPa)	14.405	29.484
Pd	最高使用圧力 (MPa)	0.427	0.427
Pa / Pd	最高使用圧力に対する許容圧力の比 (-)	33.73	69.04

c. モジュールの評価

(a) 既往の電共研による試験結果を用いた評価（高電圧モジュール）

女川原子力発電所 2 号炉の電気配線貫通部（高電圧）は、モジュール内部のエチレンプロピレンゴムにより気密性を維持しており、既往の電共研「格納容器電気ペネトレーションの特性確認試験（S63/3）報告書」における検証試験で気密性が確保されることを確認している。

この電共研では、電気配線貫通部（高電圧）を対象として、原子炉格納容器内側の電気ペネトレーション端子箱部分の環境条件を 200℃とした場合における電気ペネトレーションの気密性能について検証を行っている。

既往の電共研の試験結果を第 2.7-2 表に示す。

第2.7-2表 電共研の試験結果（高電圧）

原子炉格納容器内側 端子箱部分の環境条件				一次シール部 温度(℃)	二次シール部 温度(℃)	漏えい有無
温度(℃)	圧力 (MPa)	時間(h)	試験 雰囲気			
200 (220)	(0.61～ 0.79)	62.0	乾熱	194	44	一次シール部の漏えいなし 二次シール部の漏えいなし
・ ()内数値は、記録グラフからの読取値。 ・ 試験時の原子炉格納容器外側圧力及び高電圧モジュールのハウジング内の圧力は 0kPa[gage](大気圧)で実施。						

試験結果から、原子炉格納容器内側端子箱部分の環境条件を 200℃とした試験においては、一次シール部及び二次シール部それぞれについて漏えいはないことが確認できている。

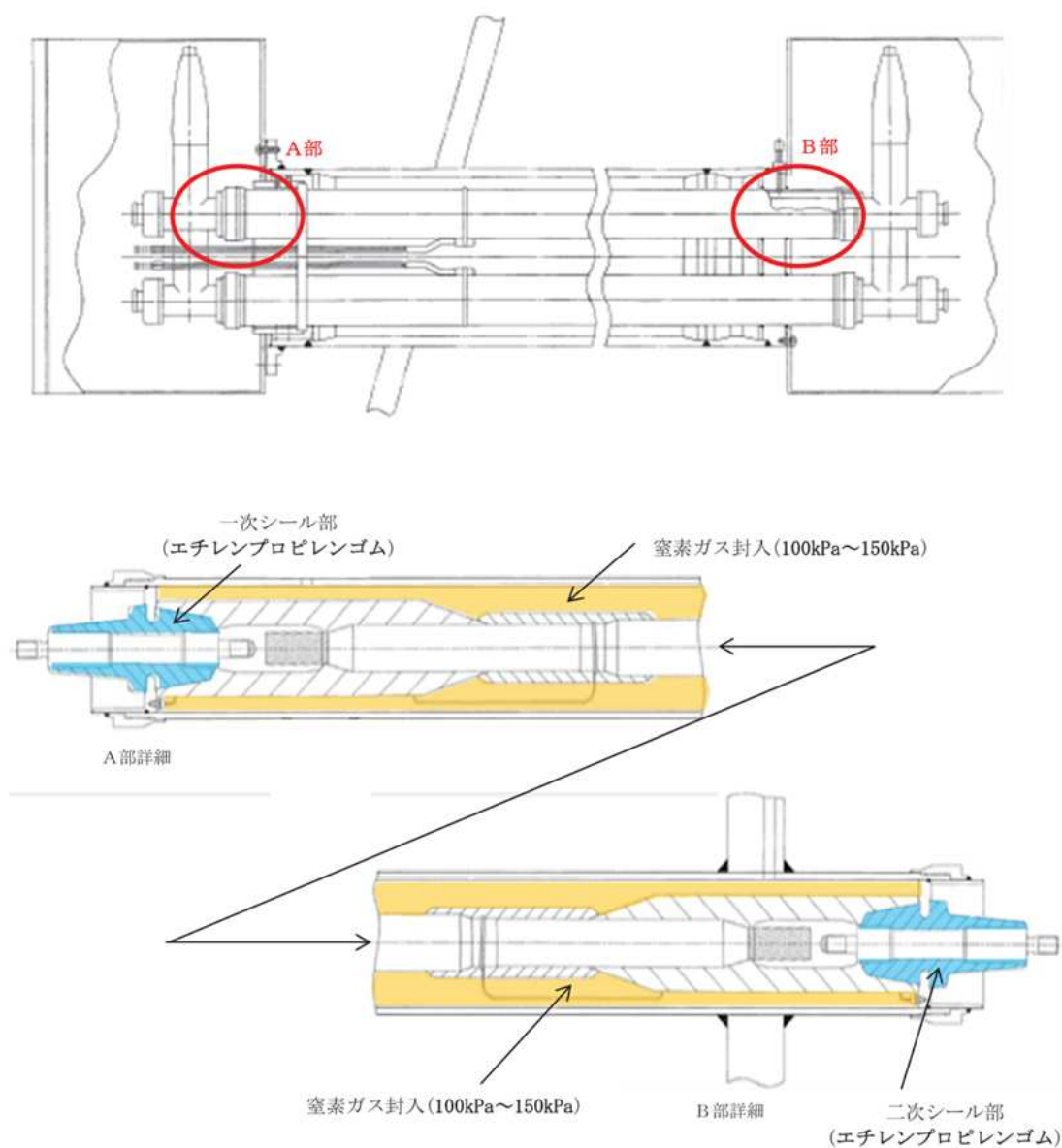
試験結果の二次シール部の温度に裕度を考慮し、二次シール部の温度を 100℃と想定して、一次シール部の熱劣化条件（194℃／62 時間）を有機物の活性化エネルギー^{*1}を用いて換算評価を行うと 3652 時間となり、168 時間（7 日間）を上回っている。

*1：有機物の活性化エネルギー 62.8kJ/mol を使用

また、圧力についても約 1.8Pd(約 0.79MPa)時に漏えいがないことが確認できている。実機の電気ペネトレーションのモジュールは、運転中におけるシール部の漏えい確認のため、その内部に窒素ガスを約 100kPa[gage]～150kPa[gage]の圧力で封入しており、原子炉格納容器内の圧力が 2Pd となった場合においても、モジュールのエチレンプロピレンゴムに加わる圧力は、704kPa～754kPa*² となり、電共研の試験圧力 790kPa 以下となることから、2Pd での環境下において漏えいがないことが確認できていると判断する。

*2 : 854kPa(2Pd) - (100kPa～150kPa) より

電気配線貫通部（高電圧）モジュールの構造図を第2.7-5図に示す。



第2.7-5図 電気配線貫通部（高電圧）モジュール構造図

(b) 既往の電共研による試験結果を用いた評価（低電圧モジュール）

女川原子力発電所 2 号炉の電気配線貫通部（低電圧）は、モジュールのエポキシ樹脂により気密性を維持しており、既往の電共研「格納容器電気ペネトレーションの特性確認試験（S63/3）報告書」における検証試験で気密性が確保されることを確認している。

この電共研では、電気配線貫通部（低電圧）を対象として、原子炉格納容器内側の電気ペネトレーション端子箱部分の環境条件を 200℃及び 400℃とした場合における電気ペネトレーションの気密性能について検証を行っている。

既往の電共研の試験結果を第2.7-3表に示す。

第2.7-3表 電共研の試験結果（低電圧）

原子炉格納容器内側 端子箱部分の環境条件				一次シール部 温度(℃)	二次シール部 温度(℃)	漏えい有無
温度(℃)	圧力 (MPa)	時間(h)	試験 雰囲気			
200 (230)	(0.60～ 0.81)	62.0	乾熱	137	68	一次シール部の漏えいなし 二次シール部の漏えいなし
400 (430)	(0.70～ 0.83)	127	乾熱	246	116	一次シール部の漏えいなし 二次シール部の漏えいなし

・ ()内数値は、記録グラフからの読取値。
・ 試験時の原子炉格納容器外側圧力及び低電圧モジュール内部の圧力は 0kPa[gage](大気圧)で実施。

試験結果から、原子炉格納容器内側端子箱部分の環境条件を 200℃及び 400℃とした試験において、一次シール部及び二次シール部それぞれについて漏えいはないことが確認できている。

200℃での試験結果の二次シール部の温度に裕度を考慮し、二次シール部の温度を 100℃と想定して、一次シール部の熱劣化条件（137℃/62 時間）を有機物の活性化エネルギー*³を用いて換算評価を行うと 385 時間となり、168 時間（7 日間）を上回っている。

一方、400℃での試験結果から、通常運転中の経年劣化を考慮し、原子炉格納容器内側の温度を 66℃として、原子炉格納容器内側端子箱部分の環境条件（400℃/9 時間）を有機物の活性化エネルギー*³を用いて換算評価を行うと約 23,786 日となり、21,900 日（60 年間）を上回っている。その後、重大事故

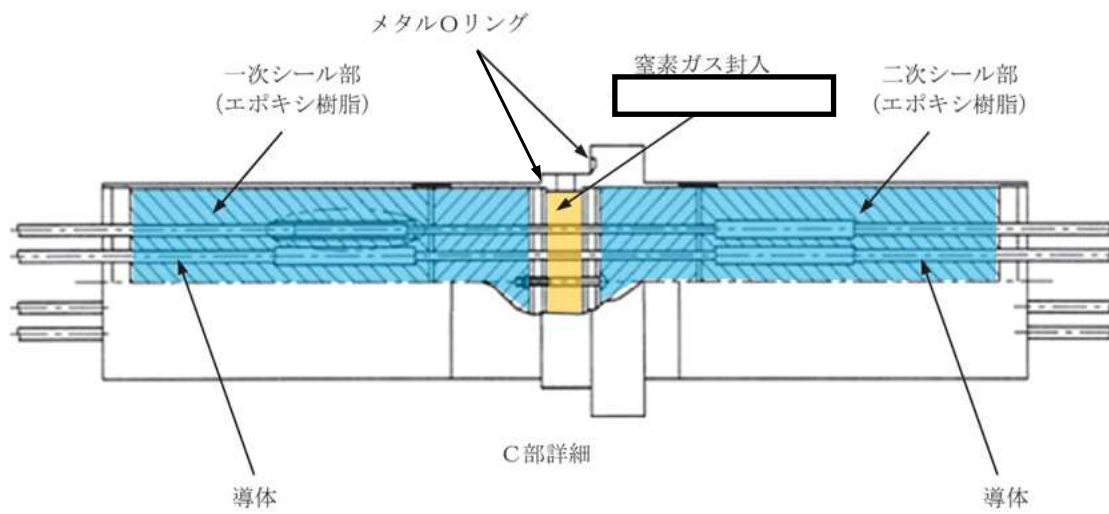
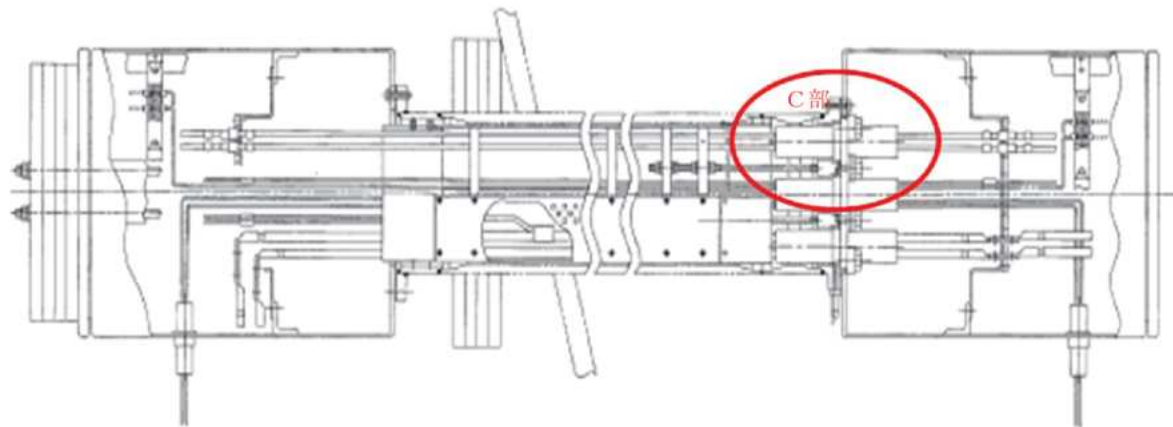
等の原子炉格納容器内側の温度を 200℃として、原子炉格納容器内側端子箱部分の環境条件（400℃／118 時間）を有機物の活性化エネルギー*³を用いて換算評価を行うと約 565 日となり、7 日間を上回っていることから、低電圧モジュール部の経年劣化分を考慮しても 200℃環境下での漏えいはないといえる。

*3：有機物の活性化エネルギー 62.8kJ/mol を使用

また、圧力についても約 1.8Pd(約 0.81MPa)時に漏えいがないことが確認できている。実機の電気ペネトレーションのモジュールは、運転中におけるシール部の漏えい確認のため、その内部に窒素ガスを約 100kPa[gage]～150kPa[gage]の圧力で封入しており、原子炉格納容器内の圧力が 2Pd となった場合においても、モジュールのエポキシ樹脂に加わる圧力は、704kPa～754kPa*⁴となり、電共研の試験圧力 810kPa 以下となることから、2Pd での環境下において漏えいがないことが確認できていると判断する。

*4：854kPa(2Pd)－(100kPa～150kPa) より

電気配線貫通部（低電圧）モジュールの構造図を第2.7-6図に示す。



第2.7-6図 電気配線貫通部（低電圧）モジュール構造図

(c) NUPEC による試験結果を用いた評価

平成 2 年度から平成 14 年度に実施された NUPEC 重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）において，モジュールの気密性の確認試験が行われている。

この試験結果を第 2.7-4 表に示す。

第 2.7-4 表 NUPEC の試験結果

種類	AM 環境下の健全性確認試験					漏えい発生条件 確認結果	
	温度(°C)	圧力(MPa)	時間(h)	雰囲気	漏えい有無	破損温度 (°C)	圧力(MPa)
高電圧モジュール	200	0.8	20	蒸気	漏えいなし	400*5	0.8
低電圧モジュール	200	0.8	20	蒸気	漏えいなし	266~303	0.8~1.0

*5：400°Cまで漏えいなし。400°Cまで昇温後，室温降下時に微少漏えい。

試験結果から，200°C，約 1.8Pd(0.8MPa)において，漏えいがないことが確認できている。また，低電圧モジュールについては，2.3Pd（1.0MPa）までは圧力に依存せず，約 260°Cまでの耐漏えい性が確認できている。

なお，実機の電気ペネトレーションのモジュールは，運転中におけるシール部の漏えい確認のため，その内部に窒素ガスを約 100kPa[gage]~150kPa[gage]の圧力で封入しているため，原子炉格納容器内の圧力が 2Pd となった場合においても，モジュールに加わる圧力は，704kPa~754kPa*6 となり，NUPEC の健全性確認試験圧力 0.8MPa 以下となることから，2Pd での環境下において漏えいがないことが確認できていると判断する。

*6：854kPa(2Pd) - (100kPa~150kPa) より

(d) 過去の試験結果を用いた評価

過去の電気配線貫通部の環境試験では、電気配線貫通部（高電圧）及び電気配線貫通部（低電圧）を対象として、冷却材喪失事故模擬試験が実施されており、高電圧及び低電圧モジュールの健全性が確認されている。

この試験結果を第 2.7-5 表に示す。

第 2.7-5 表 冷却材喪失事故時の環境試験結果

種類	
高電圧モジュール	
低電圧モジュール	

既往の電共研による試験結果を用いた評価に示すとおり、原子炉格納容器内を 200℃と模擬した試験において、二次シール部は電気配線貫通部（高電圧）で 44℃、電気配線貫通部（低電圧）で 68℃となっており、の健全性が確認された試験温度を下回っていることから、原子炉格納容器が 200℃での環境下において漏えいがないことが確認できていると判断する。

また、重大事故環境下における耐放射線性について健全性を確認するために、電気配線貫通部シール部における事象発生から積算の線量解析を実施している。その結果、60 年相当の通常運転時積算線量を加味した、重大事故環境下における原子炉格納容器内積算線量をkGy 程度と仮定した場合でも、電気配線貫通部シール部はコンクリート等による遮蔽効果により、積算線量は最大で約kGy となる。

過去に実施した健全性が確認されている電気配線貫通部の積算照射量は約kGy であることから、重大事故環境下における電気配線貫通部シール部のシー

ル健全性が確認できていると判断する。

(4) 評価結果

電気配線貫通部（高電圧）のアダプタ及びヘッドの許容圧力は約 30.4Pd 以上、電気配線貫通部（低電圧）のアダプタ及びヘッドの許容圧力は約 37.0Pd 以上であった。

また、モジュール内部のエチレンプロピレンゴム及びエポキシ樹脂は、既往の電共研、NUPEC 及び過去の環境試験の試験結果から 200℃、2Pd において気密性を確保できることを確認した。

これより、女川原子力発電所2号炉の電気配線貫通部は、200℃、2Pdにおいて耐圧部材の機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

2.8 原子炉格納容器隔離弁

原子炉格納容器隔離弁は原子炉格納容器の貫通配管に設置されており、弁箱、弁体、ボンネット及びシール部等により構成している。

原子炉格納容器隔離弁のうち、原子炉格納容器調気系バタフライ弁、移動式炉心内計装系電磁弁及び移動式炉心内計装系ボール弁は、非金属材料シール材を使用しており、200℃、2Pd の環境下における劣化によるシール能力低下が想定される。

また、200℃、2Pd の環境下における弁の耐圧部の機能喪失要因として、脆性破壊、疲労破壊、座屈及び延性破壊が考えられる。今回の評価条件である200℃、2Pdの条件を考慮した場合、脆性破壊が生じる温度域でないこと、繰返し荷重が作用しないこと、圧縮力が弁耐圧部に生じないことから、脆性破壊、疲労破壊及び座屈は評価対象外と考えることができる。

200℃、2Pdにおける原子炉格納容器隔離弁の放射性物質の閉じ込め機能喪失の要因は、高温状態で内圧を受けることによる過度な塑性変形に伴う耐圧部材の延性破壊が想定される。

このため、原子炉格納容器隔離弁のうち、原子炉格納容器調気系バタフライ弁、移動式炉心内計装系電磁弁及び移動式炉心内計装系ボール弁について、シール能力及び延性破壊を評価する。

なお、上記以外の原子炉格納容器隔離弁については、以下の理由により200℃、2Pdの環境下における健全性を有している。

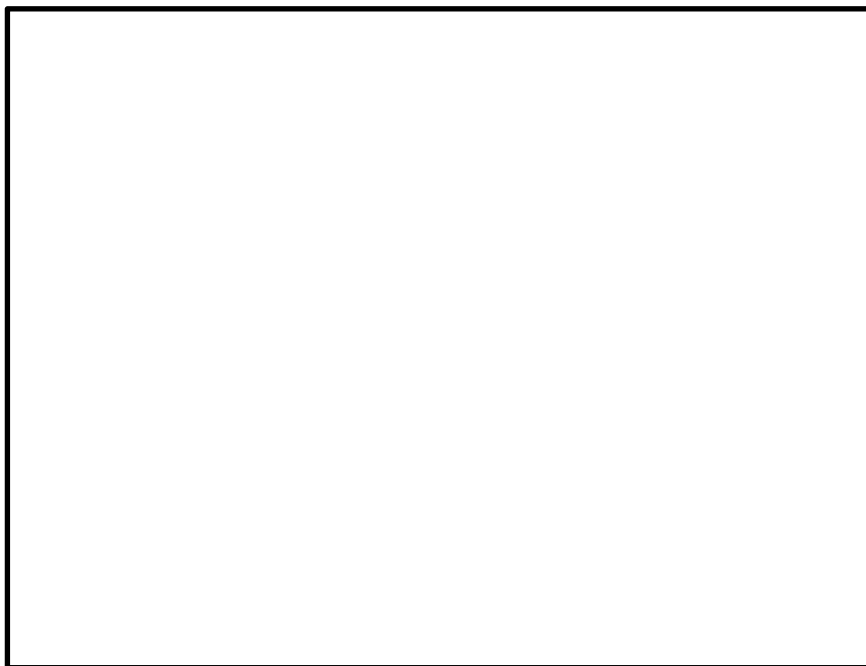
- ・弁の呼び圧力は、各配管のラインの設計圧力に応じて、レーティング設計に基づき適切に選定されており、200℃、2Pd を考慮した場合においても、耐圧性上問題となることはない。
- ・弁のグランド部及びボンネット部のシール部には、黒鉛製パッキン、ガスケット等の耐熱性に優れたものを使用しており、耐熱性上問題となることはない。
- ・弁シート部は金属製である。

原子炉格納容器隔離弁の評価対象の抽出フロー及び評価対象リストを添付
2.8-1に示す。

2.8.1 原子炉格納容器調気系バタフライ弁

(1) 評価部位

原子炉格納容器調気系バタフライ弁の構造を、第2.8.1-1図に示す。



第2.8.1-1図 原子炉格納容器調気系バタフライ弁の構造

(2) 評価方針

a. 隔離機能

原子炉格納容器調気系バタフライ弁は、弁座シート部にEPDM材を使用しており、シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

このため、弁座シート部については、より耐熱性能を向上させた改良EPDM材への変更を実施することとしている。改良EPDM材は、200℃、2Pd環境下における圧縮永久ひずみ試験及び実機相当の蒸気加熱漏えい試験を実施し、シール機能が確保されることを確認する。

b. 耐圧機能

弁の圧力クラスを確認し、200℃、2Pdの環境下における耐圧機能を確認する。

(3) 評価

a. 隔離機能

改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果，改良EPDM材でのシール機能が維持されることを確認した。また，蒸気加熱漏えい試験の結果，弁シート部からの漏えいはなくシール機能が維持されることを確認した。改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果を第2.8.1-1表に，蒸気加熱漏えい試験の結果を第2.8.1-2表に示す。

第2.8.1-1表 圧縮永久ひずみ試験*1結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3試験片の平均値（% % ， %）

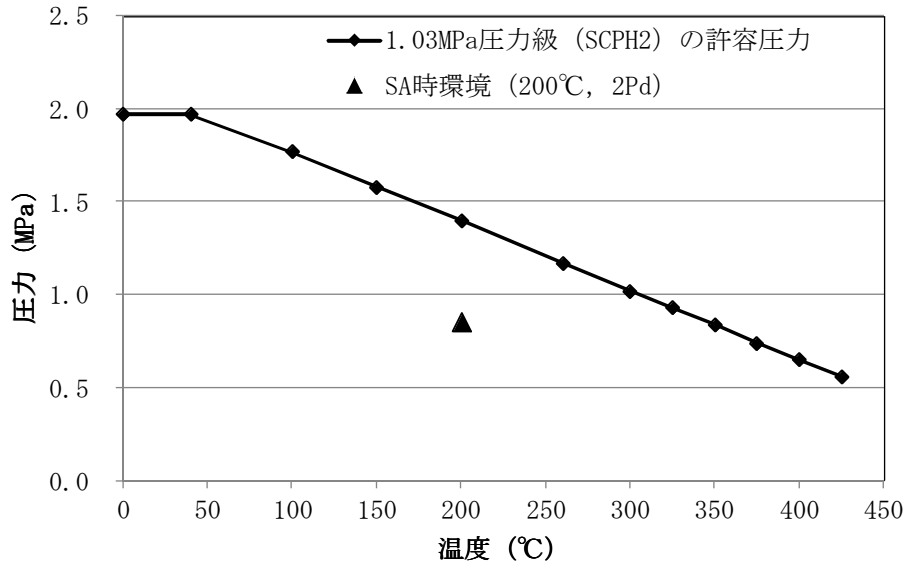
第2.8.1-2表 蒸気加熱漏えい試験結果

試験圧力	0.854MPa 以上
試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験時間	168 h
漏えい有無	無

b. 耐圧機能

原子炉格納容器調気系バタフライ弁の圧力クラスは、1.03MPa(150LB)であり、200°Cにおける許容圧力は1.40MPa(約3.2Pd)であることから、200°C、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

第2.8.1-2図に1.03MPa(150LB)圧力級の弁の温度－許容圧力を示す。



第2.8.1-2図 原子炉格納容器調気系バタフライ弁（1.03MPa(150LB)圧力級）の温度－許容圧力

(4) 評価結果

原子炉格納容器調気系バタフライ弁の隔離機能については、改良EPDM材は、圧縮永久ひずみ試験の結果及び蒸気加熱漏えい試験の結果より、200°C、2Pdの環境下においてもシール機能を確保可能であることを確認した。

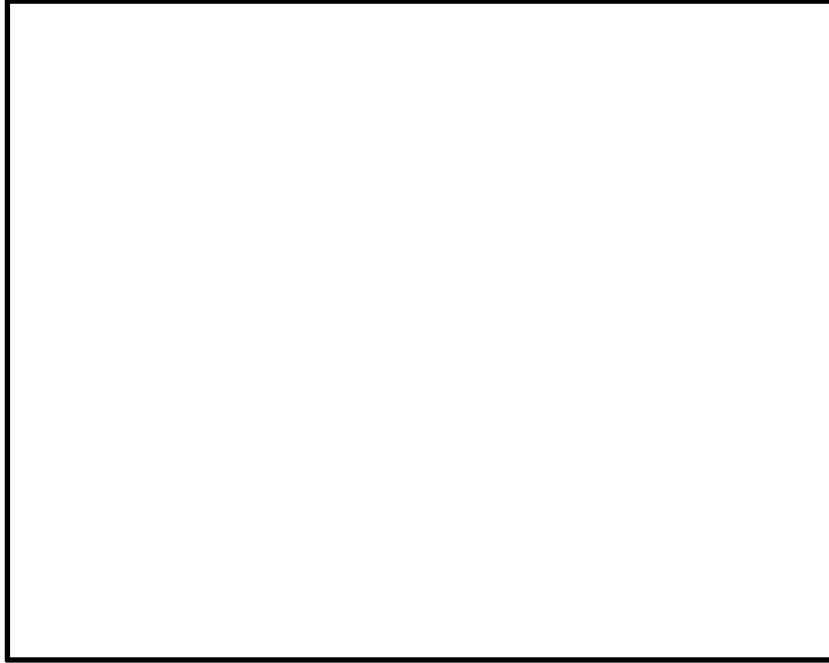
また、原子炉格納容器調気系バタフライ弁の耐圧機能については、圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり、200°Cにおける許容圧力は1.40MPa(約3.2Pd)であることから、200°C、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

以上より、女川原子力発電所2号炉の原子炉格納容器調気系バタフライ弁は200°C、2Pdにおいて耐圧部材及びシール機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

2.8.2 移動式炉心内計装系電磁弁

(1) 評価部位

移動式炉心内計装系電磁弁の構造を，第2.8.2-1図に示す。



第2.8.2-1図 移動式炉心内計装系電磁弁の構造

(2) 評価方針

a. 隔離機能

移動式炉心内計装系電磁弁は，弁体シート部及び弁ふたシール部にEPDM材を使用しており，シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

このため，弁体シート部については，金属製シートへの変更，弁ふたシール部については，より耐熱性能を向上させた改良EPDM材への変更を実施することとしている。金属製シートは，200℃，2Pdの環境下における健全性を有している。改良EPDM材は，200℃，2Pd環境下における圧縮永久ひずみ試験を実施し，シール機能が確保されることを確認する。

b. 耐圧機能

弁の圧力クラスを確認し，200℃，2Pdの環境下における耐圧機能を確認する。

(3) 評価

a. 隔離機能

金属製シートはメタルタッチ構造であるため、200℃、2Pdの環境下においても、シール機能を確保可能である。また、改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果、改良EPDM材でのシール機能が維持されることを確認した。改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果を、第2.8.2-1表に示す。

第2.8.2-1表 圧縮永久ひずみ試験*1結果

試験温度	200 °C
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

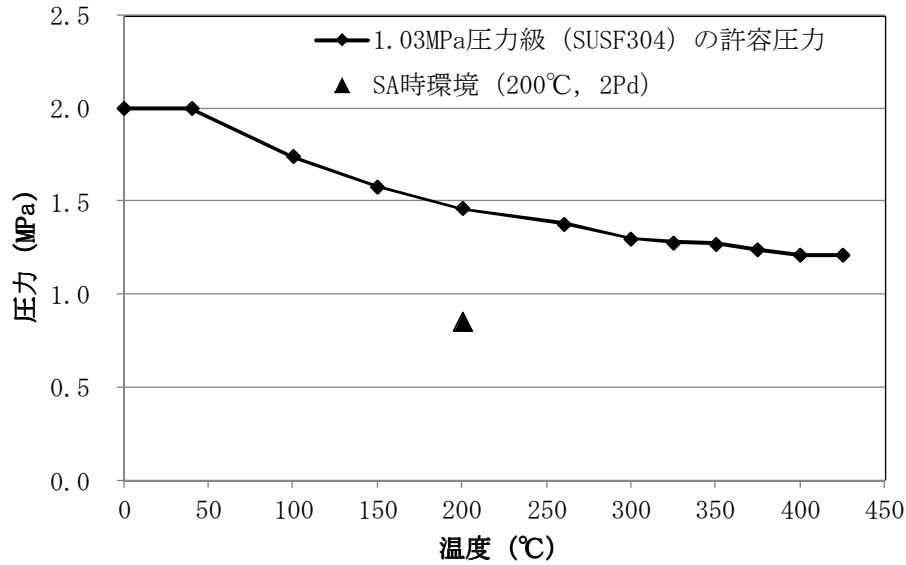
*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3 試験片の平均値 (% , % , %)

b. 耐圧機能

移動式炉心内計装系電磁弁の圧力クラスは、1.03MPa(150LB)であり、200℃における許容圧力は1.46MPa(約3.4Pd)であることから、200℃、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

第2.8.2-2図に1.03MPa(150LB)圧力級の弁の温度－許容圧力を示す。



第2.8.2-2図 移動式炉心内計装系電磁弁（1.03MPa(150LB)圧力級）の
温度－許容圧力

(4) 評価結果

移動式炉心内計装系電磁弁の隔離機能については、金属製シートは、メタルタッチ構造のため、200°C、2Pdの環境下においてもシール機能を確保可能であり、改良EPDM材は、圧縮永久ひずみ試験の結果より、200°C、2Pdの環境下においてもシール機能を確保可能であることを確認した。

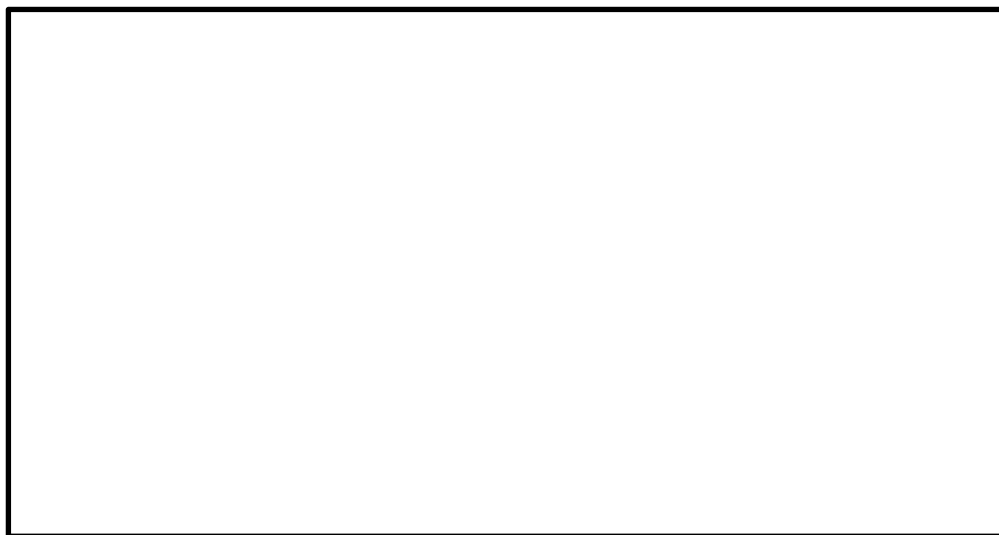
また、移動式炉心内計装系電磁弁の耐圧機能については、圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり、200°Cにおける許容圧力は1.46MPa(約3.4Pd)であることから、200°C、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

以上より、女川原子力発電所2号炉の移動式炉心内計装系電磁弁は200°C、2Pdにおいて耐圧部材及びシール機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

2.8.3 移動式炉心内計装系ボール弁

(1) 評価部位

移動式炉心内計装系ボール弁の構造を，第2.8.3-1図に示す。



第2.8.3-1図 移動式炉心内計装系ボール弁の構造

(2) 評価方針

a. 隔離機能

移動式炉心内計装系ボール弁は，弁座シート部にフッ素樹脂，弁ふたシール部にシリコンゴムを使用しており，シール材の劣化によるシール能力の低下が想定される。

このため，弁座シート部及び弁ふたシール部については，より耐性の高いPEEK材又は改良EPDM材への変更を実施することとしているため，PEEK材は一般的な材料特性の確認により，改良EPDM材は圧縮永久ひずみ試験の結果により，シール機能が確保されることを確認する。

b. 耐圧機能

弁の圧力クラスを確認し，200℃，2Pdの環境下における耐圧機能を確認する。

(3) 評価

a. 隔離機能

PEEK材の一般的な材料特性より、PEEK材は200℃以上の耐高温性があり、シール機能を確保できることを確認した。PEEK材の材料特性を第2.8.3-1表に示す。

第2.8.3-1表 PEEK材の材料特性

項目	PEEK材
耐熱温度(℃)	250
耐放射線性(Gy)	約10 ⁷

また、改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果、改良EPDM材でのシール機能が維持されることを確認した。改良EPDM材の圧縮永久ひずみ試験の結果を、第2.8.3-2表に示す。

第2.8.3-2表 圧縮永久ひずみ試験*1結果

試験温度	200 ℃
放射線照射量	<input type="text"/> kGy
試験雰囲気	蒸気
試験片	3 個
試験時間	168 h
ひずみ率	<input type="text"/> %*2

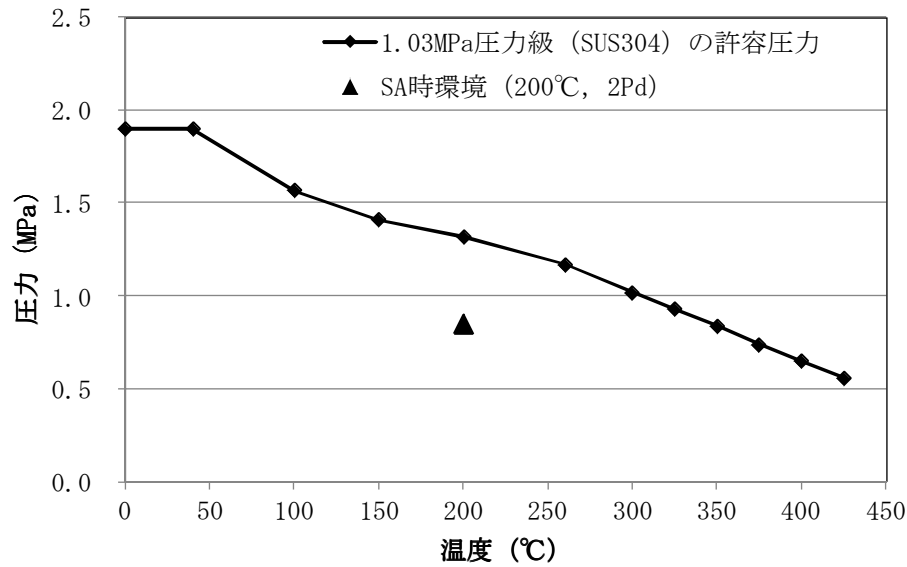
*1：JIS K6262 に従い実施

*2：3 試験片の平均値 (% , % , %)

b. 耐圧機能

移動式炉心内計装系ボール弁の圧力クラスは、1.03MPa(150LB)であり、200℃における許容圧力は1.32MPa(約3.0Pd)であることから、200℃、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

第2.8.3-2図に1.03MPa(150LB)圧力級の弁の温度－許容圧力を示す。



第2.8.3-2図 移動式炉心内計装系ボール弁（1.03MPa(150LB)圧力級）の温度－許容圧力

(4) 評価結果

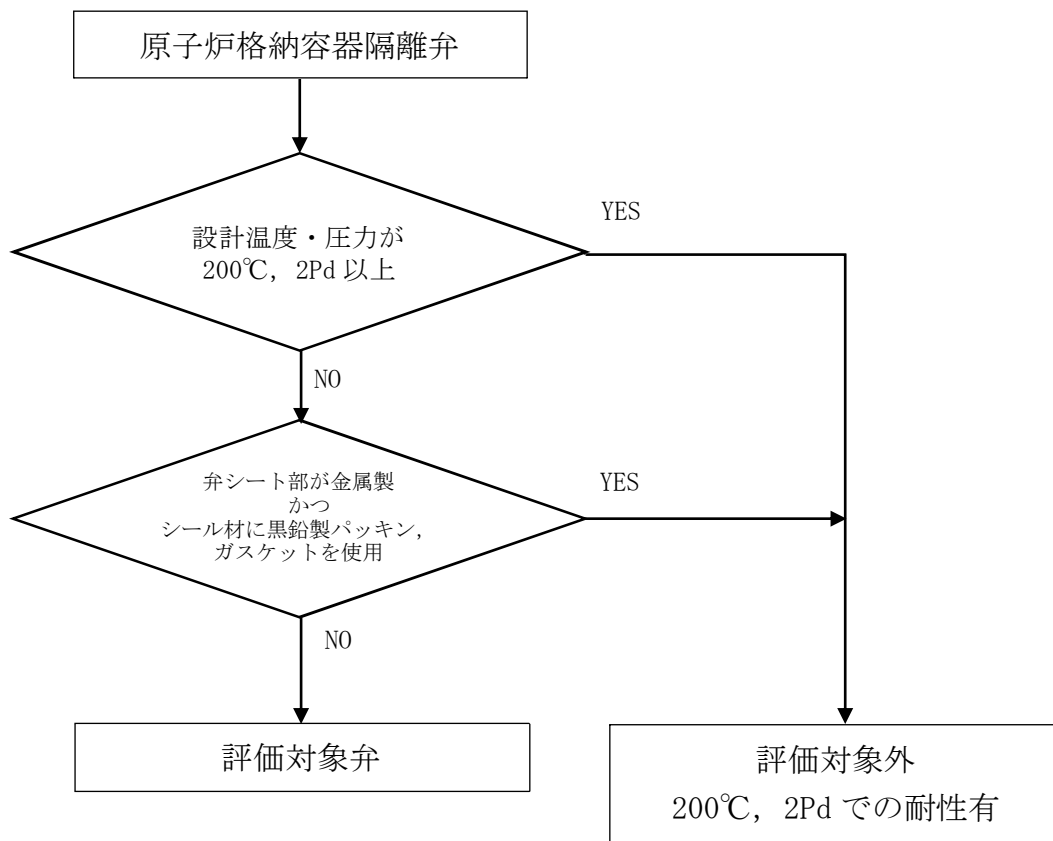
移動式炉心内計装系ボール弁の隔離機能について、PEEK材の一般的な材料特性より、PEEK材は200°C以上の耐熱性があり、シール機能を確保できることを確認した。また、改良EPDM材は、圧縮永久ひずみ試験の結果より、200°C、2Pdの環境下においてもシール機能を確保可能であることを確認した。

また、移動式炉心内計装系ボール弁の耐圧機能について、圧力クラスは1.03MPa(150LB)であり、200°Cにおける許容圧力は1.32MPa(約3.0Pd)であることから、200°C、2Pdの環境下においても、耐圧機能が維持されることを確認した。

以上より、女川原子力発電所2号炉の移動式炉心内計装系ボール弁は200°C、2Pdにおいて耐圧部材及びシール機能は維持され、放射性物質の閉じ込め機能を確保できる。

原子炉格納容器隔離弁の評価対象の抽出フロー及び評価対象リスト

今回評価を実施した評価対象の抽出フローを第2.8-1-1図，評価対象リストを第2.8-1-1表に示す。



第 2.8-1-1 図 原子炉格納容器隔離弁の評価対象抽出フロー

第2.8-1-1表 原子炉格納容器隔離弁の評価対象リスト

弁番号	弁名称	呼び径	呼び圧力 (LB)	弁箱 材質	最高使用 圧力 (MPa)	最高使用 温度 (℃)	弁体シート部材質		弁座シート部材質		弁ふたシール部材質	
							現行材	代替材	現行材	代替材	現行材	代替材
C51-F081A	T I Pバルブアセンブリ (ボール弁)	0. D15mm	150		0. 427	171						
C51-F081B	T I Pバルブアセンブリ (ボール弁)	0. D15mm	150		0. 427	171						
C51-F081C	T I Pバルブアセンブリ (ボール弁)	0. D15mm	150		0. 427	171						
C51-F081D	T I Pバルブアセンブリ (ボール弁)	0. D15mm	150		0. 427	171						
C51-F083	T I Pバージ隔離弁	20A	150		0. 427	171						
T48-F001	バージ用空気供給側隔離弁	600A	150		0. 427	171						
T48-F002	D/Wバージ用入口隔離弁	600A	150		0. 427	171						
T48-F003	S/Cバージ用入口隔離弁	600A	150		0. 427	171						
T48-F005A	格納容器外真空逃がし隔離弁 (A)	600A	150		0. 427	104						
T48-F005B	格納容器外真空逃がし隔離弁 (B)	600A	150		0. 427	104						
T48-F016	バージ用窒素ガス供給側第二隔離弁	450A	150		0. 427	171						
T48-F020	ベント用SGTS側隔離弁	300A	150		0. 427	171						
T48-F021	ベント用HVAC側隔離弁	600A	150		0. 427	171						
T48-F043	PCV 耐圧強化ベント用連絡配管隔離弁	300A	150		0. 427	171						

補足 19-211