

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-04-0330-3_改0
提出年月日	2021年3月30日

補足-330-3 原子炉格納容器内の原子炉冷却材の漏えいを監視する装置の構成並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する補足説明資料

2021年3月
東北電力株式会社

目次

1. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間について	1
2. ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置の演算時間について	3
3. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による漏えい検出の評価時間の 保守性について	5
4. 凝縮水量が平衡に達する時間に関する妥当性について	8
5. ドレン配管移送時間の算出について	10
6. 漏えい検出設備の検出時間評価に使用する配管及び床面の粗度係数について	11
7. ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置の漏えい検出の評価時間の 保守性について	12
8. ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置監視不能時の対応について	16

1. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間について

ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置は、容積式流量検出器からのパルス信号を、変換器にて電流信号へ変換し、床漏えい検出表示盤内の演算装置にて流量信号に変換し監視する。なお、容積式流量検出器においては $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) のような低流量域においても計測できるよう、適切な容量を有するバケット（容量： 100ml ）を選定している。

警報動作範囲は、 $0\sim 5\text{l}/\text{min}$ で設定可能であり、全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) の蒸気分 ($1.5\text{l}/\text{min}$) の漏えいに相当する流量になる前 ($1.35\text{l}/\text{min}$) に、流量高の警報を中央制御室に発信する。なお、警報動作流量以上の流量では、警報動作状態を継続する。（図1-1「ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の概略構成図」参照）

パルス信号積算値出力は1分毎に更新され、変換器の出力は1分間のパルス信号積算値出力を1分間保持する設計としていることから、ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出遅れ時間を2分とする。（図1-2「ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間の考え方」参照）

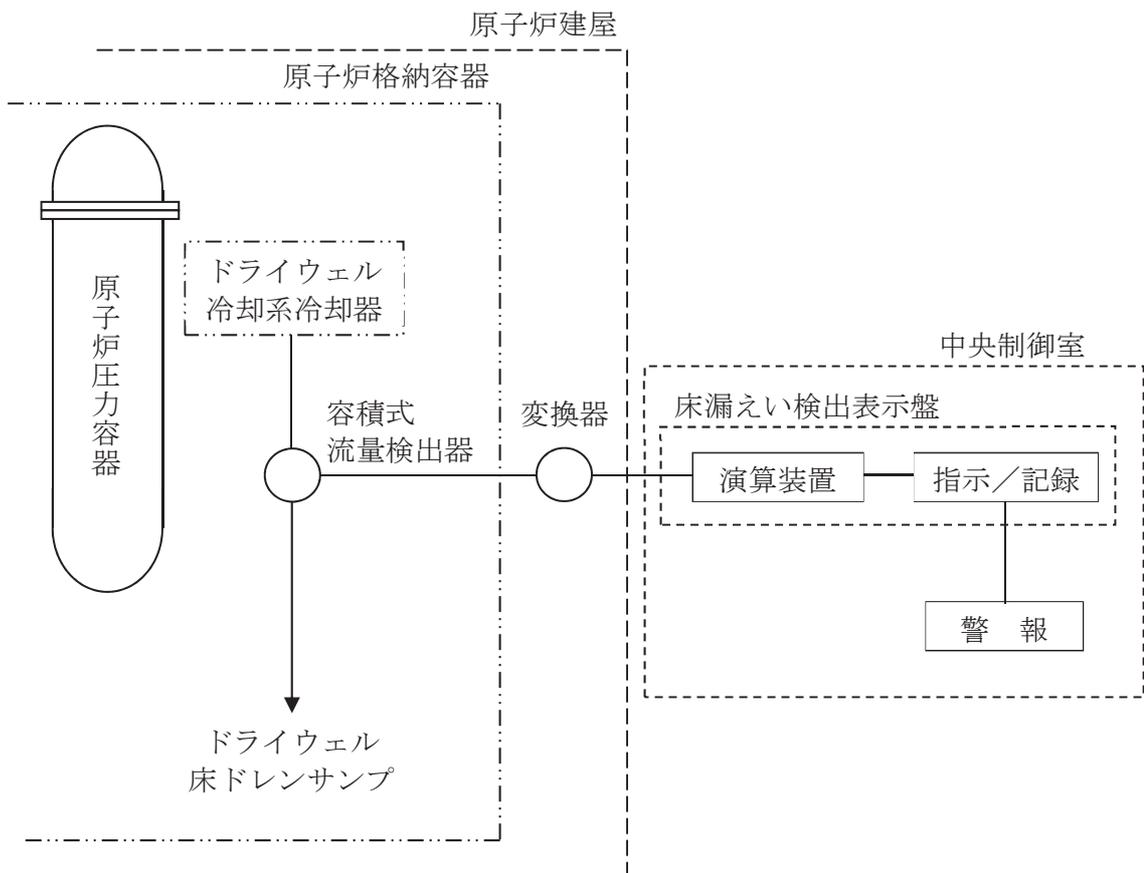


図1-1 ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の概略構成図

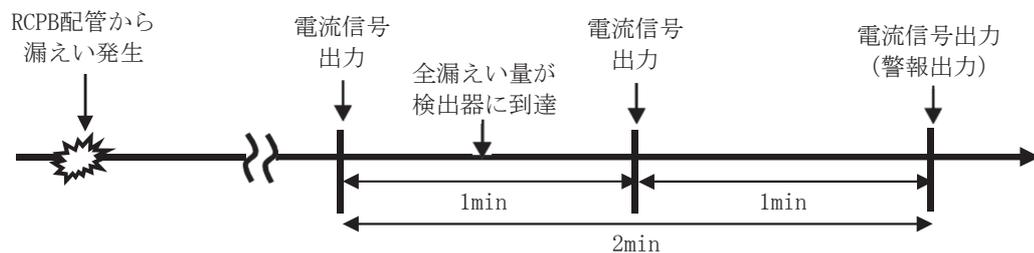


図1-2 ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間の考え方

2. ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の演算時間について

ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置は、超音波式水位検出器からの電流信号を、サンプ制御盤内の指示部及び記録部にて水位信号に変換し監視する。

警報動作範囲は、0～1900mmで設定可能であり、全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) の漏えいに相当する水位変化率 ($23\text{mm}/14\text{min}$) になると水位変化率高の警報を中央制御室に発信する。なお、警報動作水位変化率以上の変化率では、警報動作状態を継続する。(図2-1「ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の概略構成図」参照)

水位変化率の設定要求値は、ドライウェル床ドレンサンプに全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) が流入したときの水位変化は $1.7\text{mm}/\text{min}$ であるが、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測精度は $\pm 23\text{mm}$ であり、 23mm の水位変化に相当する時間は 14min ($23\text{mm} \div 1.7\text{mm}/\text{min}$) となる。

この水位変化率を演算処理する際は、床ドレンサンプポンプが停止しており、かつ、床ドレンサンプ水面が安定している状態の水位測定装置による水位信号が必要であるため、水位変化率を演算処理するプロセス計算機ではこの処理を行う条件として、床ドレンサンプポンプ運転中 ($0.23\text{m}^3/\text{h}$ を排出する時間である1分23秒) 及び床ドレンサンプポンプ停止後 (3分) の4分23秒は演算処理を行わない条件とし、水位変化率の演算処理は水位検出信号を1分周期で平均処理したデータから、14分前の同データを減算して水位変化率を監視する。

このため、ドレン流入開始のタイミングを考慮した検出時間は18分23秒となるが、保守的に19分後に検出可能な設計としている。(図2-2「ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の演算時間」参照)

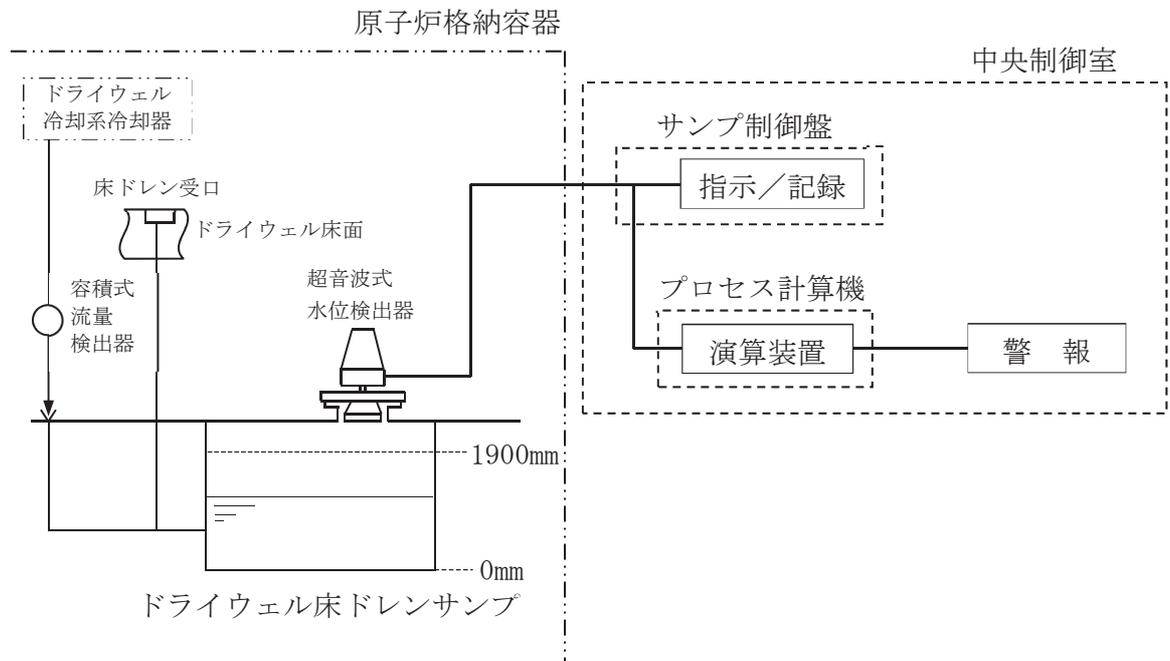


図2-1 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の概略構成図

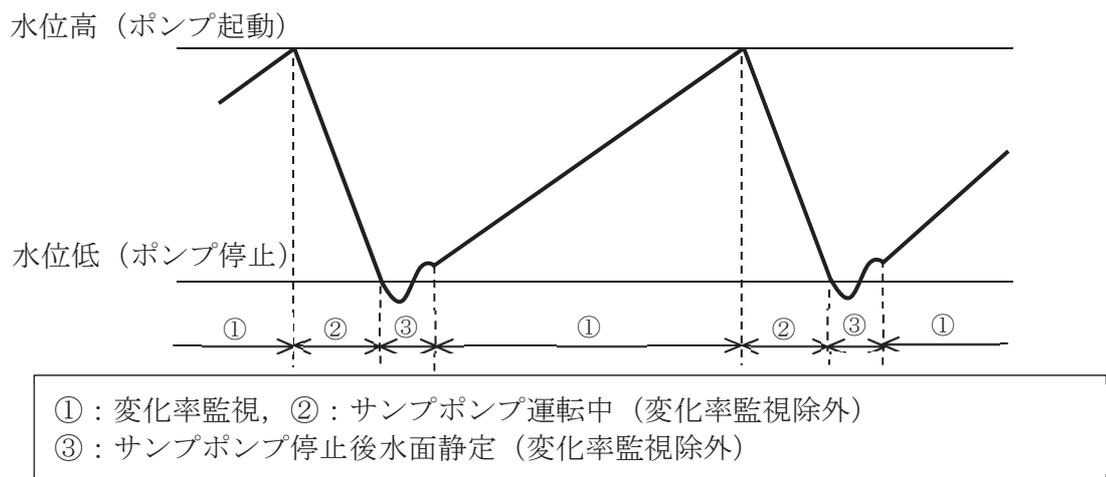


図2-2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の演算時間

3. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による漏えい検出の評価時間の保守性について

ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による漏えい検出時間 ($T_1 \sim T_3$ の合計30分) には、以下のとおり保守性を見込んでおり、ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間 (T_4) の2分を加えても60分を超えないため、問題なく1時間以内に $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) の蒸気分 ($1.5\text{l}/\text{min}$) の漏えい量を検出可能である。

3.1 ドライウェル冷却系冷却器までの蒸気到達時間： $T_1=3$ 分における保守性

漏えいした蒸気がドライウェル冷却系冷却器（以下「冷却器」という。）の冷却コイルに達し、冷却が開始されるまでの時間 T_1 を評価する際には、冷却器に到達するまでの時間に「3.2 凝縮水量が平衡に到達する時間」で述べる原子炉格納容器内に漏えいした蒸気が徐々に充満し平衡状態となる過程も一部で始まっているが、そのことは考慮せず保守的に評価している。

また、RCPB配管から漏えいした蒸気が冷却器の冷却コイルに達する最長経路は、漏えい蒸気を含む原子炉格納容器内の空気がドライウェル冷却系送風機（以下「送風機」という。）により一巡する時間を T_1 とすることで保守的に評価している。

3.2 凝縮水量が平衡に到達する時間： $T_2=22$ 分における保守性

漏えい蒸気が凝縮に要する時間は、冷却器における凝縮水量が蒸気分の漏えい量と平衡となる時間として評価している。ここで、本評価に対しては確実に漏えい蒸気分の検出を可能とするために、ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の警報設定値を漏えい蒸気の90%とすることで対応する。

凝縮水量と経過時間の関係は、図3-1に示すとおりであり、凝縮水量が蒸気分の漏えい量の90%に達する時間は約21.1分である。これを保守的に22分としている。

また、平衡に達する時間の妥当性については、「4. 凝縮水量が平衡に達する時間に関する妥当性について」にて示す。

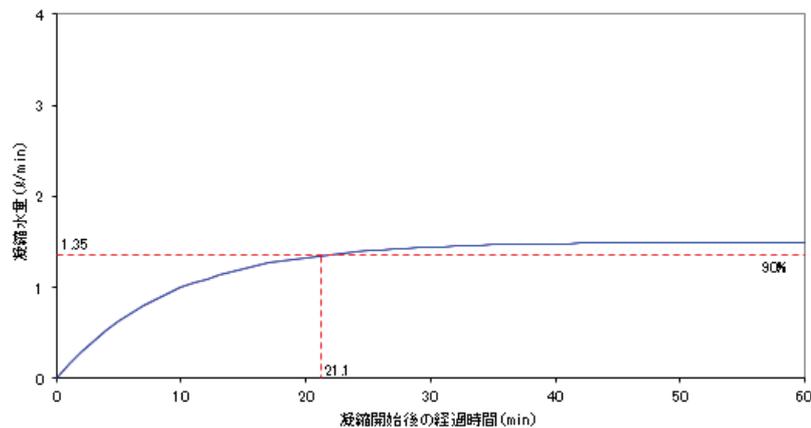


図3-1 凝縮水量が平衡に達する時間

3.3 ドレン配管移送時間（ドライウエル冷却系冷却器～ドライウエル送風機冷却コイルドレン流量測定装置）：T₃=5分における保守性

冷却器からドライウエル送風機冷却コイルドレン流量測定装置までのドレン配管には、垂直部、水平部（1/100こう配）があるが、ドレン配管移送時間を評価する際には、保守的に垂直部を含む全体を水平部と同じ1/100こう配と仮定し、さらに評価用長さを配管の設計長さに1.1倍を乗じて評価している。

なお、冷却器からドライウエル送風機冷却コイルドレン流量測定装置までのドレン配管には、25A、50A及び80Aの配管口径があるが、最も保守的となる80Aの配管は全体の約5%であり、配管長さの余裕10%に含まれるため、すべての配管を50Aと仮定し評価している。

垂直配管の流速は水平部より早くなり、さらに小さい配管口径の流速は大きい配管口径より早くなることから、実際の検出時間は評価時間よりも短くなると考えられる。

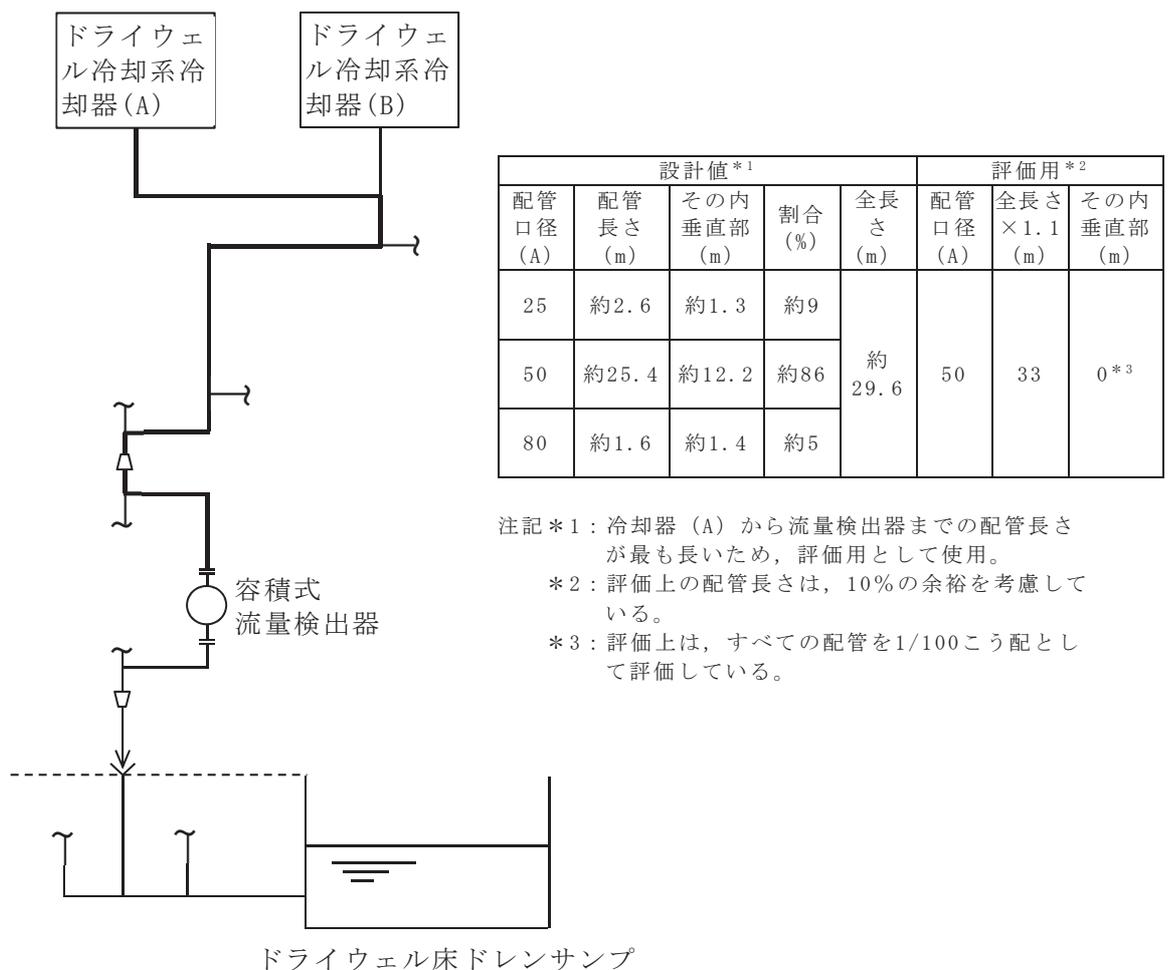


図3-2 ドレン配管移送時間

（ドライウエル冷却系冷却器～ドライウエル送風機冷却コイルドレン流量測定装置）

3.4 ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出遅れ時間： $T_4=2$ 分

ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出遅れ時間を「1. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置の検出時間について」に示す。

4. 凝縮水量が平衡に達する時間に関する妥当性について

4.1 ドライウェル冷却系の設置目的について

ドライウェル冷却系は、通常運転時において、冷却器及び送風機によりドライウェル内雰囲気絶えず循環させ、原子炉格納容器内の機器、配管等からの発熱を除去するために設置している。

4.2 ドライウェル冷却系の構造・機能について

4.2.1 ドライウェル冷却系の構成について

RCPB配管から原子炉格納容器内へ漏えいが生じたときに、蒸気分については原子炉格納容器に配置されるドライウェル冷却系にて冷却される。原子炉格納容器内に冷却器及び送風機はそれぞれ上部に3台、下部に3台が設置されており、通常運転時は上部、下部ともに各2台運転とし、各1台を予備としている。

また、上部冷却器は換気空調補機常用冷却水系より冷水を供給し、冷却と除湿を行い、下部冷却器は原子炉補機冷却水系より冷水を供給し、冷却を行い、ドライウェル雰囲気露点温度を低く保つ設計としている。

冷却器は、冷却コイル、ドレンパン、エアフィルタ、ケーシング等により構成され、冷水を冷却コイルに通水し、送風機を起動することにより、水、空気を熱交換し空気を冷却するものである。冷却器概略図を下記の図4-1に示す。

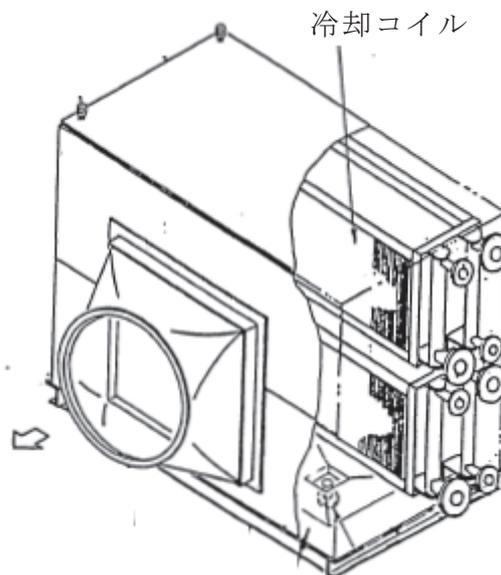


図4-1 冷却器の概略図

4.2.2 ドライウェル冷却系の冷却能力について

ドライウェル冷却系は、通常運転時において、ドライウェル内の機器、配管等からの発熱を除去するため、また、ドライウェル内配管の大気による腐食防止対策として、ドライウェル雰囲気露点温度を低く保つために設置している。

プラント通常運転時、ドライウェル内に設置されている各機器からの放熱及びサブレーションプール、格納容器床ドレンサンプからの蒸発分の凝縮による熱負荷は1.140MW程度である。一方、上部冷却器及び下部冷却器の交換熱量（合計）は1.313MWであることから、ドライウェル内雰囲気を平衡状態に維持することができる。

4.2.3 蒸気漏えい時

蒸気漏えいが発生した場合には、ドライウェル冷却系の熱負荷に凝縮潜熱分の除熱能力が追加される。原子炉冷却材の漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\ell/\text{min}$) に相当する蒸気 $1.5\ell/\text{min}$ ($=1.5\text{kg}/\text{min}$) を凝縮するために必要な除熱量は 0.056MW であり、次式で求められる。

$$1.5\text{kg}/\text{min} \div 60 \times (2.676 \times 10^6 \text{J}/\text{kg} - 0.419 \times 10^6 \text{J}/\text{kg}) = 0.056\text{MW}$$

〔	漏えい量 Q_1	: $1.5\text{kg}/\text{min}$ (蒸気分)	〕
	大気圧での蒸気のエンタルピ	: $2.676 \times 10^6 \text{J}/\text{kg}$	
	大気圧での水のエンタルピ	: $0.419 \times 10^6 \text{J}/\text{kg}$	

以上より、 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\ell/\text{min}$) の漏えいにより蒸気漏えいが発生した際のドライウェル冷却系の上部冷却器及び下部冷却器は、凝縮潜熱分 0.056MW の除熱能力が追加されるものの、上部冷却器及び下部冷却器の交換熱量（合計）は 1.313MW であることから、十分な除熱能力を有している。したがって、漏えい蒸気は、ドライウェル冷却系にて問題なく凝縮するものと考えられる。

5. ドレン配管移送時間の算出について

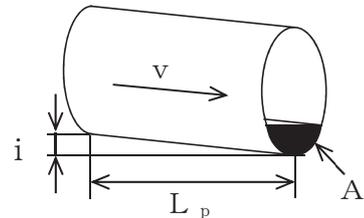
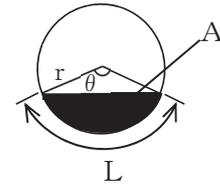
ドレン配管移送時間 (T_3, T_5, T_7, T_8) の算出において、ドレンの流速 v を求めるときに解が複数存在する場合がありますため、このときの算出条件について、以下に示す。

ガンギェ・クッタの経験式は開きよ（上蓋のされていない水路）に適用される経験式であるため、水密状態に近い範囲 ($180 \leq \theta \leq 360$) は適用範囲外となる。

(算出式：ガンギェ・クッタの経験式)

$$v = C \sqrt{m \cdot i} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$C = \frac{23 + (1/n) + (0.00155/i)}{1 + \{23 + (0.00155/i)\} \cdot (n/\sqrt{m})} \quad \dots \dots (5.2)$$



記号	記号説明	単位	計算式
n	粗度係数	—	配管材固有の値
i	こう配	—	—
r	配管半径	m	—
Q	流量	m ³ /s	Q = v · A
θ	弦の角度	rad	仮定値
L	ぬれ縁長さ	m	L = r · θ
A	断面積	m ²	A = 1/2 × r ² (θ - sin θ)
m	平均深さ	m	m = A / L
C	流速係数	—	(5.2) 式
L _p	配管長	m	—
v	平均流速	m/s	(5.1) 式
T	時間遅れ	min	T = L _p / v / 60

実際の計算においては、平均流速 v 、断面積 A 及びぬれ縁長さ L を求める必要がある。

ここで、弦の角度 θ により求まる平均深さ m をある値と仮定することで断面積 A 及びぬれ縁長さ L を算出し、上記 (5.1) 式及び (5.2) 式により求めた平均流速 v から算出した流量 Q と漏えい量が同値となるまで収束計算を行うことで算出する。

6. 漏えい検出設備の検出時間評価に使用する配管及び床面の粗度係数について

6.1 ドレン配管の粗度係数

冷却器にて凝縮した凝縮水をドライウエル床ドレンサンプまで移送するドレン配管及び保温材からの漏えい水をドレン配管入口からドライウエル床ドレンサンプまで移送するドレン配管内を流れる漏えい水の流速は、シェジー形の公式及びガンギェ・クッタの経験式を基に算出しており、この際に配管の内面粗さを表すパラメータとして粗度係数を使用している。

本評価で使用する粗度係数は、「機械工学便覧」に記載されている黄銅管の粗度係数（0.009～0.013）を参考に0.01としている。

なお、粗度係数は以下に示すManning-Stricklerの式を用いて評価することも可能であり、実機におけるステンレス鋼管の粗度係数は0.01以下となることも考慮し、本評価で用いる粗度係数は0.01としている。

（算出式：Manning-Stricklerの式）

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{7.66 \times \sqrt{g}}$$

n：粗度係数

k_s：相当粗度（＝配管内面粗さ）

g：重力加速度（＝9.80665m/s²）

表6-1 ステンレス鋼管の粗度係数

	ステンレス鋼管
相当粗度 k _s	5×10 ⁻⁵ m*
粗度係数 n	0.008

注記*：メーカー標準値

6.2 床面の粗度係数

保温材からの漏えい水がドライウエル床面を通じてドレン配管入口まで移動する際の流速は、シェジー形の公式及びガンギェ・クッタの経験式を基に算出しており、この際に床面の粗さを表すパラメータとして粗度係数を使用している。

本評価で使用する粗度係数は、「機械工学便覧」に記載されている純セメント平滑面の粗度係数（0.009～0.013）を参考にしており、発電所の床面は塗装により滑らかであるが、本評価では0.013とし、保守的な評価としている。

7. ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の漏えい検出評価時間の保守性について

ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による漏えい検出時間 ($T_1 \sim T_3$ の合計30分) には、「3. ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による漏えい検出の評価時間の保守性について」のとおり保守性を見込んでおり、以下に示すドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置からドライウェル床ドレンサンプまでのドレン配管移送時間 (T_5) 及びドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間 (T_9) の合計22分を加えても60分を超えないため、問題なく1時間以内に $0.23\text{m}^3/\text{h}$ の漏えい量(蒸気分)を検知可能である。

また、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置による漏えい検出時間 ($T_6 \sim T_8$ の合計40分) には、以下のとおり保守性を見込んでおり、ドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間 (T_9) の19分を加えても60分を超えないため、問題なく1時間以内に $0.23\text{m}^3/\text{h}$ の漏えい量(液体分)を検知可能である。

7.1 ドレン配管移送時間(ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置～ドライウェル床ドレンサンプ) : $T_5 = 3$ 分における保守性

ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置からドライウェル床ドレンサンプまでのドレン配管には、垂直部、水平部(1/100こう配)があるが、ドレン配管移送時間を評価する際には、保守的に垂直部を含む全体を水平部と同じ1/100こう配と仮定し、さらに評価用長さを配管の設計長さに1.1倍を乗じて評価している。

また、ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置からドライウェル床ドレンサンプまでのドレン配管には、25A、50A及び80Aの配管口径があるが、最も保守的となる80Aが全体の約94%であるため、すべての配管を80Aと仮定し評価している。

垂直配管の流速は水平部より早くなり、さらに小さい配管口径の流速は大きい配管口径より早くなることから、実際の検出時間は評価時間よりも短くなると考えられる。

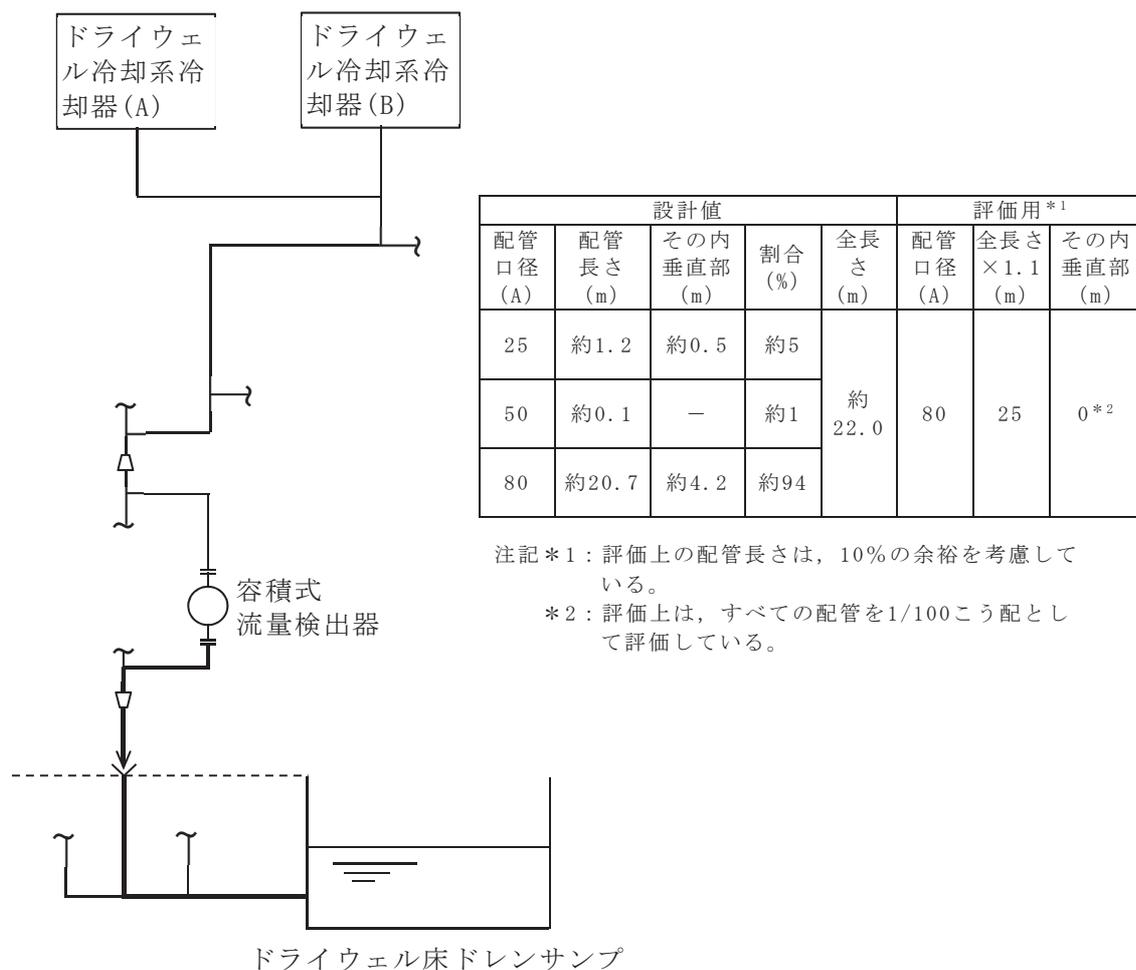


図7-1 ドレン配管移送時間

(ドライウエル送風機冷却コイルドレン流量測定装置～ドライウエル床ドレンサンプル)

7.2 保温材から漏れ出るまでの時間： $T_6 = 33$ 分の保守性

原子炉冷却材配管は保温材（金属保温）を設置しており、円周方向に一体構造ではなく、独立に2分割された金属保温を止め合せて取り付けられている。保温材は水が滞留しないよう設計されているが、保温材から漏えい水が漏れ出るまでの時間 T_6 は、保守的に漏えい水が2分割の一部の保温材及び保温材と原子炉冷却材配管のすき間の2分割部分に滞留後、接合部から漏れ出ると仮定し算出している。漏えい水が保温材に入り込むとは考えにくいですが、保温材の2分割の下半分に入り込むと仮定することで、漏えい水が保温材の接合部まで達し流れ出るまでの時間を保守的に評価している。なお、本評価では保守的に原子炉冷却材を内包する配管の金属保温材のうち、2分割で水平配管に設置される保温材内容積が最も大きい箇所を評価している。

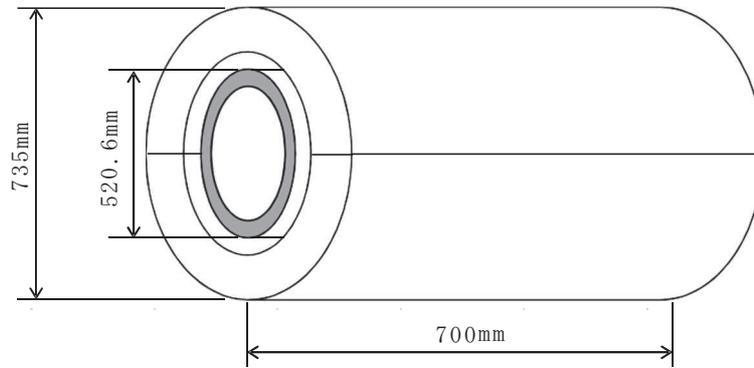


図7-2 金属保温材から漏れ出るまでの時間における概略図

7.3 ドレン配管入口までの到達時間： $T_7 = 3$ 分における保守性

保温材からの漏えい水はドライウェル床面に落下し、床ドレン受口に向かうこう配（約1/100）にしたがって流れる。本評価における落下位置は、配管の真下ではなく原子炉格納容器内においてドレン配管入口（床ドレン受口）から最も離れている箇所から評価することで保守的な評価としている。

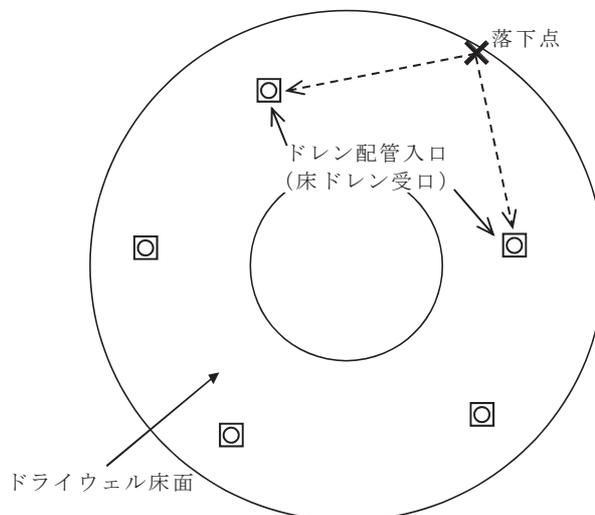


図7-3 落下点からドレン配管入口（床ドレン受口）までの到達時間における概略図

7.4 ドレン配管移送時間（ドレン配管入口～ドライウェル床ドレンサンプ）： $T_8=4$ 分における保守性

ドレン配管入口からドライウェル床ドレンサンプまでのドレン配管には、垂直部、水平部（1/100こう配）があるが、ドライウェル床ドレンサンプから最も離れた位置にある床ドレン受口を対象とし、ドレン配管移送時間を評価する際には、保守的に垂直部を含む全体を水平部と同じ1/100こう配と仮定し、さらに評価用長さを配管の設計長さに1.1倍を乗じて評価している。

垂直配管の流速は水平部より早くなることから実際の検出時間は評価時間よりも短くなると考えられる。

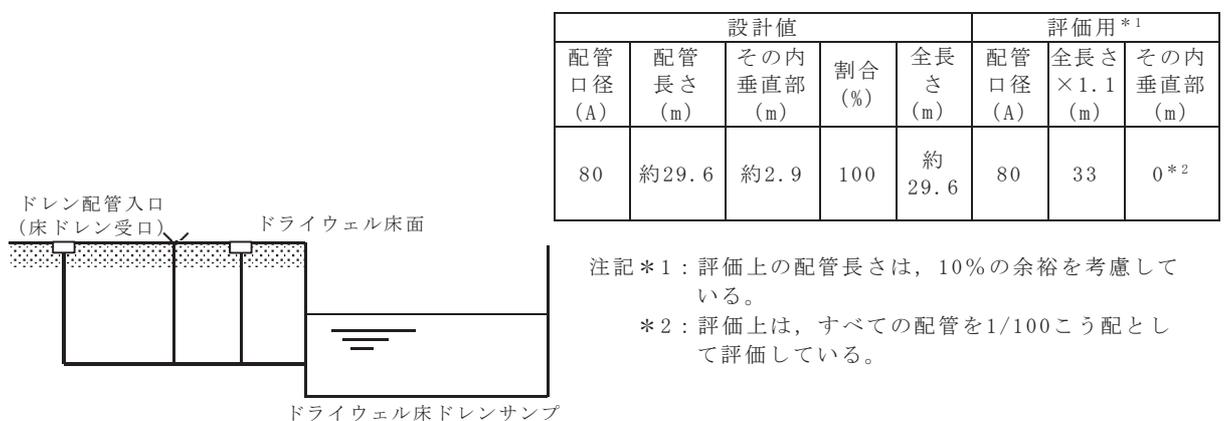


図7-4 ドレン配管移送時間（ドレン配管入口～ドライウェル床ドレンサンプ）

7.5 ドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間： $T_9=19$ 分における保守性

ドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間における保守性を「2. ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の演算時間について」に示す。

8. ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置監視不能時の対応について

RCPB配管からの原子炉冷却材の漏えいの検出装置として、漏えい位置を特定できない原子炉格納容器内への漏えいに対しては、ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置を使用するが、当該装置が故障した場合は、当該装置の復旧に努めるとともに、ドライウェル送風機冷却コイルドレン流量測定装置による確認（原子炉冷却材漏えい時の冷却器の蒸気凝縮量の増加）及び格納容器内ダスト放射線濃度測定装置による確認（原子炉冷却材漏えい時の核分裂生成物放出量の増加）を行う。

なお、ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置の故障判断については、通常運転時における当該装置の監視及び点検の結果により行う。