

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 1-048 改 02
提出年月日	2022年7月29日

VI-1-4-1 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に関する説明書並びに計測範囲及び警報動作範囲に関する説明書

2022年7月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
3. 漏えいを監視する装置の構成	4
3.1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置	5
3.2 ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置	6
3.3 漏えい検出時間	7
3.3.1 検出時間の評価方法	7
3.3.2 漏えい水が蒸気になる割合	8
3.3.3 記号の定義	9
3.3.4 検出時間の算出	12
3.3.5 検出時間	19
3.3.6 原子炉冷却材圧力バウンダリの範囲の拡大が検出時間に与える影響	25
4. 漏えいを監視する装置の計測範囲及び警報動作範囲	26
4.1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の計測範囲及び警報動作範囲	26
4.2 ドライウェル床ドレンサンプル水位測定装置の計測範囲及び警報動作範囲	27

1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則（以下「技術基準規則」という。）」第28条及びその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（以下「解釈」という。）」に基づき、原子炉冷却材圧力バウンダリに属する配管等（以下「RCPB配管」という。）から原子炉冷却材の漏えいが生じた場合に、漏えいを確実に、かつ速やかに検出する監視装置の構成並びに計測範囲及び警報動作範囲について説明するものである。また、これらの監視装置は、RCPB配管の破断前漏えいを監視する観点で使用する。

なお、技術基準規則第28条及びその解釈に関わるRCPB配管（拡大範囲を除く。）からの原子炉冷却材の漏えいを監視する装置に関しては、技術基準規則の要求事項に変更がないため、今回の申請において変更は行わない。

今回は、原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲となる弁MV222-6（残留熱除去系炉水入口内側隔離弁）から弁MV222-7（残留熱除去系炉水入口外側隔離弁）まで、弁AV222-3A, B（A, B-残留熱除去系炉水戻り試験可能逆止弁）から弁MV222-11A, B（A, B-残留熱除去ポンプ炉水戻り弁）まで、及び弁V222-7（残留熱除去系炉頂部冷却水逆止弁）から弁MV222-14（残留熱除去系炉頂部冷却内側隔離弁）までの配管の拡大範囲を含め漏えい位置を特定できない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について説明する。

2. 基本方針

RCPB配管からの原子炉冷却材の漏えいの検出装置として、原子炉格納容器内への漏えいに対しては、ドライウェル機器ドレンサンプ水位測定装置、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置及びドライウェル内雰囲気放射性物質濃度測定装置を設置する設計とする。そのうち、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水位測定装置により1時間以内に0.23m³/h（1gpm）の漏えい量*を検出する能力を有した設計とするとともに中央制御室へ自動的に警報を表示する設計とする。ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置が故障した場合は、これと同等の機能を有するドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置及びドライウェル内雰囲気放射性物質濃度測定装置により、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を検知可能な設計とする。なお、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置及びドライウェル内雰囲気放射性物質濃度測定装置により監視する設計の変更は行わない。

原子炉冷却材は高温高圧であり、RCPB配管からの漏えいは蒸気と液体（水）に分離され、原子炉格納容器内に漏えいする。

原子炉格納容器内への漏えいのうち蒸気分については、原子炉格納容器内に設置する各機器からの放熱量に漏えいした0.23m³/h（1gpm）の蒸気分（1.5ℓ/min）を凝縮させるための熱量を加えても十分な冷却能力を有するドライウェル冷却系冷却機により凝縮され、これらの凝縮水はドレン配管内を流れてドライウェル床ドレンサンプへ流入する。ドレン配管に流入した凝縮水は、ドレン配管に設置したドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置により、漏えい量を検出できる設

計とする。

原子炉格納容器内への漏えいのうち液体分(2.3ℓ/min)については、漏えい水がRCPB配管の保温材内に滞留した後、保温材から漏れ出し、床面等を経由して、ドライウェル床ドレンサンプに流入する。これらの流入水をドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置で水位変化率を測定することにより、漏えい量を検出できる設計とする。

(「図2-1 漏えい監視装置の概略図」参照)

注記*：原子炉冷却材圧力バウンダリからの漏えいでないことが確認されていない漏えい率の制限値

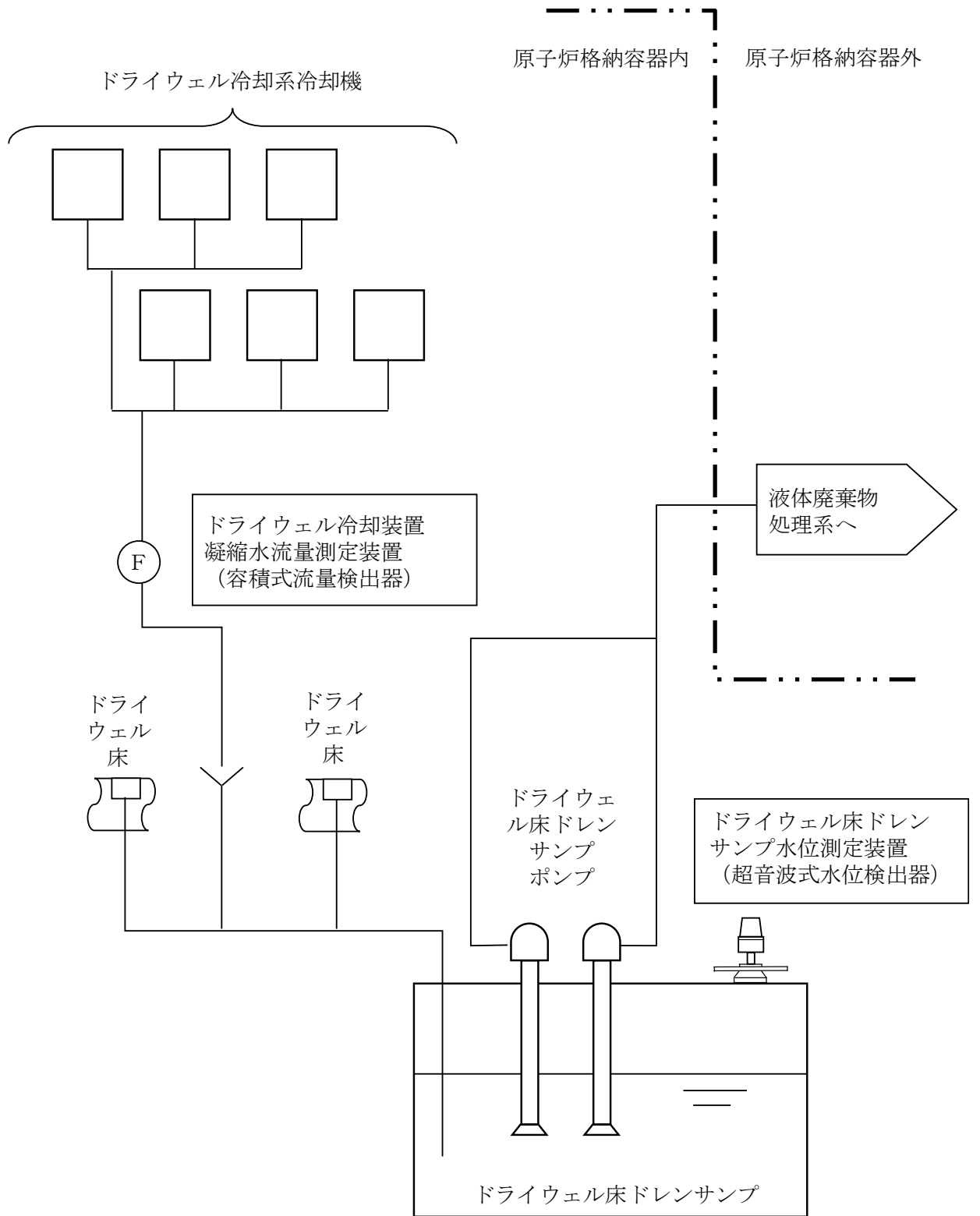


図2-1 漏えい監視装置の概略図

3. 漏えいを監視する装置の構成

高温高圧の原子炉冷却材が原子炉格納容器内に放出されると、原子炉格納容器内の雰囲気における飽和蒸気と飽和水になる。漏えいの検出装置は、エネルギー保存の式より38%相当が飽和蒸気となり、残り62%相当が飽和水となることを考慮する。

(「3.3.2 漏えい水が蒸気になる割合」参照)

RCPB配管からの漏えいのうち蒸気分については、漏えい量の38%相当の蒸気をドライウェル冷却系冷却機で凝縮することにより漏えい水を回収し、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置にて漏えいを検出する設計とする。その構成について「3.1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置」に示す。

また、RCPB配管からの漏えいのうち液体分については、ドライウェル床を流れ、ドレン配管を経て、ドライウェル床ドレンサンプに流入する設計であり、すべての漏えい水（液体分及び蒸気分の凝縮水の合計）をドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置で検出する設計とする。その構成について「3.2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置」に示す。

これらの漏えい検出装置が、1時間以内に0.23m³/h (1gpm) の漏えいを検出することについて「3.3 漏えい検出時間」に示す。

3.1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置

RCPB配管からの漏えいのうち蒸気分は、ドライウェル冷却系冷却機で凝縮させ凝縮水として収集されドレン配管を經由してドライウェル床ドレンサンプに流入する。このドレン配管に設置されたドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置により、漏えい量を検出する。

ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出信号は、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に変換後、演算装置を經由して指示部及び記録部にて流量信号へ変換する処理を行った後、ドライウェル冷却装置凝縮水流量を中央制御室に指示し、記録する。また、検出信号が警報設定値に達した場合には、中央制御室に音とともに警報表示を行う。

(「図3-1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の概略構成図」参照)

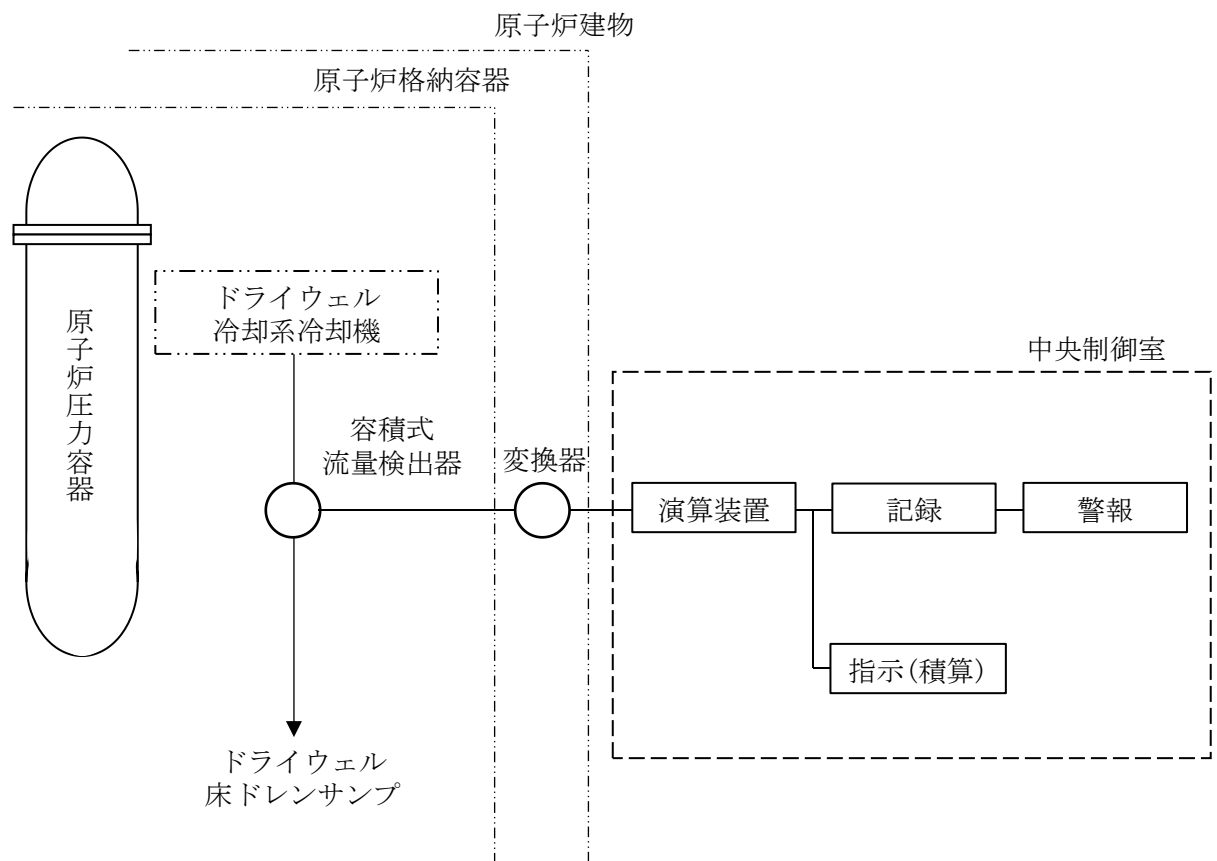


図3-1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の概略構成図

3.2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置

RCPB配管からの漏えいのうち液体分は、ドライウェル床を流れ、ドレン配管を経て、ドライウェル床ドレンサンプに流入する。さらに、ドライウェル床ドレンサンプには、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置からの凝縮水も流入するため、ドライウェル床ドレンサンプにすべての漏えい水が流入する。したがって、漏えい箇所により、流入経路が違うものの、すべての漏えい水がドライウェル床ドレンサンプへ流入することから、漏えい箇所から流入までに要する時間が最大となる時間以降は、漏えい量と同量の流入となる。このドライウェル床ドレンサンプに設置されたドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置により、漏えい量に相当する水位変化を検出する。

ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出信号は、超音波式水位検出器からの電気信号を、演算装置にて流量信号へ変換する処理を行った後、ドライウェル床ドレンサンプ流量を監視するとともに、中央制御室の記録部で水位信号へ変換する処置を行った後、ドライウェル床ドレンサンプ水位を記録する。また、検出信号が警報設定値に達した場合には、中央制御室に音とともに警報表示を行う。（「図3-2 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）

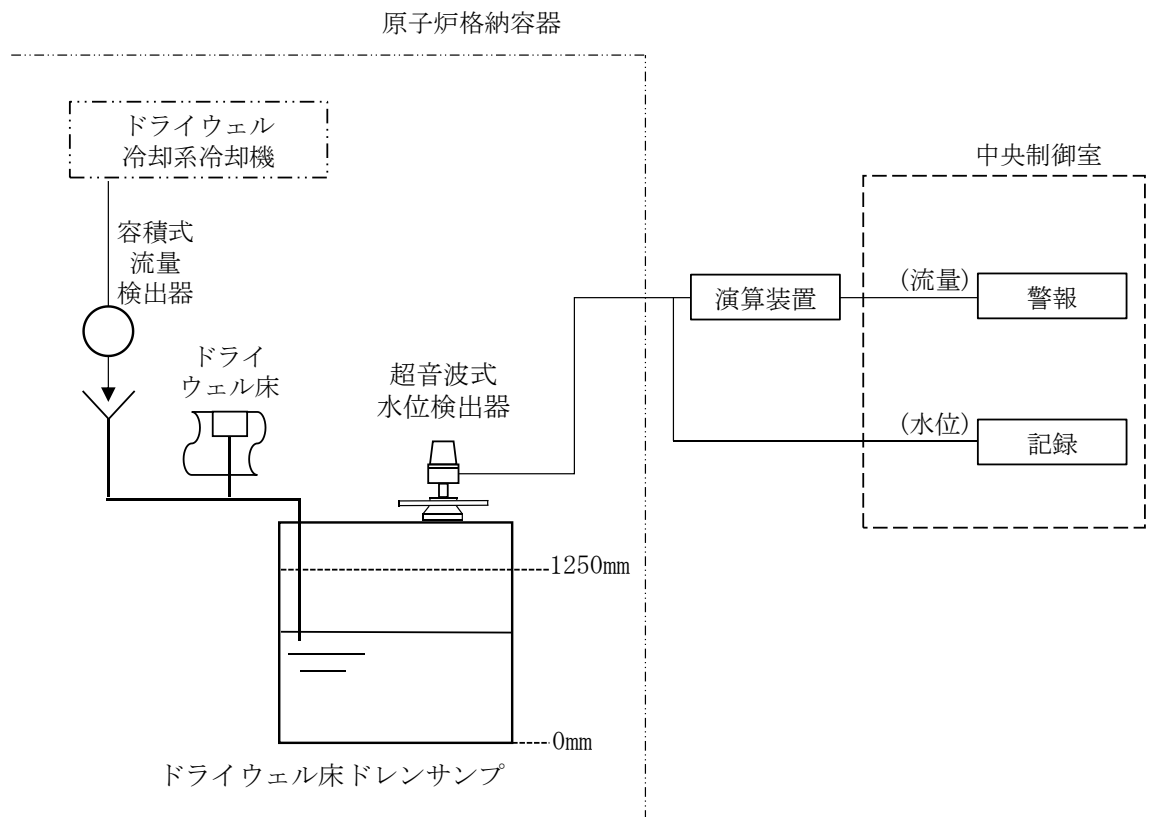


図3-2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の概略構成図

3.3 漏えい検出時間

3.3.1 検出時間の評価方法

RCPB配管からの漏えいは蒸気と液体（水）に分離されることから、飽和蒸気と飽和水になる割合を求め、漏えい発生から0.23m³/h（1gpm）相当の漏えいを検出するまでの時間について個別に算出する。蒸気分は、ドライウェル冷却系冷却機で凝縮することにより漏えい水を回収し、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置で漏えいを検出するまでの時間とする。液体分は、ドライウェル床からドレン配管を経由してドライウェル床ドレンサンプに回収し、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置で漏えいを検出するまでの時間及びドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置からドレン配管を経由してドライウェル床ドレンサンプに回収し、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置で漏えいを検出するまでの時間とする。

ここでは、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置及びドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置での漏えい検出時間について、以下の「図3-3 漏えい検出時間について」に示す漏えい箇所から検出装置までの経路における遅れ時間要素（T₁～T₉）を考慮し最大となる時間を算出しても1時間以内に漏えいが検出できることを評価する。

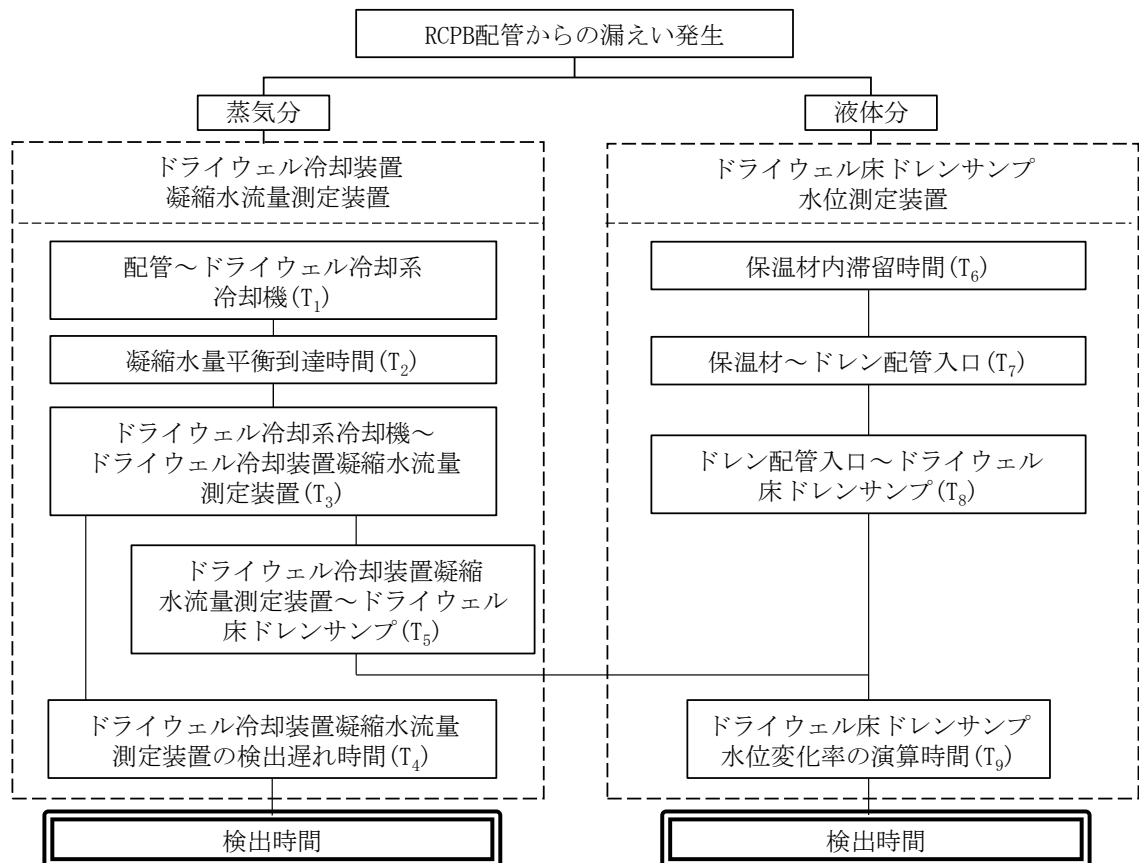


図3-3 漏えい検出時間について

3.3.2 漏えい水が蒸気になる割合

RCPB配管からの漏えい水は、漏れ出した際、瞬時に原子炉格納容器内の雰囲気における飽和蒸気と飽和水に変化するため、断熱変化として評価する。漏えい水が蒸気になる割合を以下のエネルギー保存の式により求める。

$$\begin{aligned} i_1 &= i_2 \cdot X + i_2' (1-X) \\ &= i_2 \cdot X + i_2' - i_2' \cdot X \\ X &= \frac{i_1 - i_2'}{i_2 - i_2'} \end{aligned}$$

表3-1 漏えい水が蒸気になる割合に使用する記号の定義

	記号	単位	定義
漏えい水が蒸気になる割合	X	—	蒸発する割合
	i_1	J/kg	原子炉冷却材のエンタルピ*
	i_2	J/kg	大気圧での蒸気のエンタルピ°
	i_2'	J/kg	大気圧での水のエンタルピ°

注記*：原子炉定格圧力（6.93MPa）における飽和水のエンタルピ°

表3-2 漏えい水が蒸気と液体（水）になる割合

インプットパラメータ		計算結果	
		蒸気になる割合	液体になる割合
i_1 ：原子炉冷却材のエンタルピ°*1	1.269×10^6 (J/kg)	0.38 (38%)	0.62*2 (62%)
i_2 ：大気圧での蒸気のエンタルピ°	2.676×10^6 (J/kg)		
i_2' ：大気圧での水のエンタルピ°	0.419×10^6 (J/kg)		

注記*1：原子炉定格圧力（6.93MPa）における飽和水のエンタルピ°

*2：蒸気になる割合の残りを液体の割合とする。

3.3.3 記号の定義

漏えい検出時間の計算に用いる記号について、以下に説明する。

表3-3 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出時間の計算
に使用する記号の定義

	記号	単位	定義
ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出時間	T_1	min	ドライウェル冷却系冷却機までの蒸気到達時間 (配管～ドライウェル冷却系冷却機)
	T_2	min	凝縮水量が平衡に達する時間 (凝縮水量平衡到達時間)
	T_3	min	ドレン配管移送時間 (ドライウェル冷却系冷却機～ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置)
	T_4	min	ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出遅れ時間
	V	m^3	ドライウェル内自由体積
	Q_G	m^3/min	ドライウェル冷却系送風機風量
	Q_F	m^3/min	除湿に寄与するドライウェル冷却系冷却機風量
	Q_L	l/min	漏えい量 (蒸気分)
	X	l/m^3	ドライウェル内雰囲気湿分
	X_0	l/m^3	ドライウェル冷却系冷却機出口湿分
	Q	l/min	ドライウェル冷却系冷却機での凝縮水量
	v_3	m/s	ドレン配管を流れる漏えい水の平均流速 (ドライウェル冷却系冷却機～ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置)
	C	—	流速係数
	i	—	こう配
	n	—	粗度係数
	A	m^2	流路断面積
	Q_D	m^3/h	ドレン配管を流れる漏えい水の流量
	m	m	平均深さ
L	m	ドレン配管のぬれ縁長さ	
L_3	m	ドレン配管の長さ (ドライウェル冷却系冷却機～ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置)	

表3-4 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間（蒸気分）
の計算に使用する記号の定義

	記号	単位	定義
ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間	T_1	min	ドライウェル冷却系冷却機までの蒸気到達時間 (配管～ドライウェル冷却系冷却機)
	T_2	min	凝縮水量が平衡に達する時間（凝縮水量平衡到達時間）
	T_3	min	ドレン配管移送時間 (ドライウェル冷却系冷却機～ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置)
	T_5	min	ドレン配管移送時間 (ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置～ドライウェル床ドレンサンプ)
	T_9	min	ドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間
	v_5	m/s	ドレン配管を流れる水の平均流速 (ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置～ドライウェル床ドレンサンプ)
	C	—	流速係数
	i	—	こう配
	n	—	粗度係数
	A	m ²	流路断面積
	Q_D	m ³ /h	ドレン配管を流れる漏えい水の流量
	m	m	平均深さ
	L	m	ドレン配管のぬれ縁長さ
	L_5	m	ドレン配管の長さ (ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置～ドライウェル床ドレンサンプ)

表3-5 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間（液体分）
の計算に使用する記号の定義

		記号	単位	定義
ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間	液体分	T ₆	min	保温材から漏れ出るまでの時間（保温材内滞留時間）
		T ₇	min	ドレン配管入口までの到達時間 （保温材～ドレン配管入口）
		T ₈	min	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）
		d ₁	m	保温材外径
		d ₂	m	配管外径
		L ₆	m	保温材最大長さ
		Q ₂	ℓ/min	漏えい量（液体分）
		v ₈	m/s	ドレン配管を流れる漏えい水の平均流速 （ドレン配管入口～ドライウェル床ドレンサンプ）
		C ₇	—	流量係数
		C ₈	—	流速係数
		B	m	越流幅
		h	m	越流水深
		i	—	こう配
		n	—	粗度係数
		A ₇	m ²	ドライウェル床面積
		A ₈	m ²	流路断面積
		Q _i	m ³	ドライウェル床面の滞留量
		Q ₀	m ³ /h	ドレン配管への流出量
		Q _D	m ³ /h	ドレン配管を流れる漏えい水の流量
		m	m	平均深さ
		L	m	ドレン配管のぬれ縁長さ
L ₇	m	堤頂幅		
L ₈	m	床ドレン管の長さ （ドレン配管入口～ドライウェル床ドレンサンプ）		

3.3.4 検出時間の算出

検出時間の評価方法に基づき、漏えい水が蒸気になる割合及び記号の定義を踏まえ漏えい検出時間を算出する。

(1) ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出時間

- a. ドライウエル冷却系冷却機までの蒸気到達時間（配管～ドライウエル冷却系冷却機）： T_1

RCPB配管からの漏えいのうち、蒸気分は保温材継目より直ちに保温材外に出ると考える。漏れ出た蒸気は、やがてドライウエル冷却系冷却機の冷却コイルに達し、冷却されて凝縮水となる。

本項では、RCPB配管からの漏えいした蒸気がドライウエル冷却系冷却機の冷却コイルに達し、冷却が開始されるまでの時間を評価する。

RCPB配管が設置されている空間の雰囲気はドライウエル冷却系送風機により強制的に循環することから、RCPB配管から漏えいした蒸気がドライウエル冷却系冷却機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雰囲気がドライウエル冷却系送風機により一巡する経路であると考えられる。したがって、ドライウエル冷却系冷却機までの到達時間は、安全側に評価して、原子炉格納容器内の雰囲気がドライウエル冷却系送風機により一巡する時間 T_1 を求める。

$$T_1 = \frac{V}{Q_G}$$

- b. 凝縮水量が平衡に達する時間（凝縮水量平衡到達時間）： T_2

RCPB配管から漏えいした蒸気により、一定の時間をかけて原子炉格納容器内の湿分が増加するとともに、ドライウエル冷却系冷却機における凝縮水量が増加するが、最終的には漏えい蒸気量とドライウエル冷却系冷却機における凝縮水量が同量になり、原子炉格納容器内の状態が平衡状態に達する。

本項では、漏えい蒸気量とドライウエル冷却系冷却機における凝縮水量が同量になるまでの時間を評価する。

ドライウエル冷却系冷却機の冷却コイルで冷却された凝縮水が平衡に達するために必要な時間 T_2 は、以下の式の原子炉格納容器内の湿分の時間変化量（左辺）と原子炉格納容器内部への漏えい量及び凝縮量（右辺）により微分方程式及び初期条件 $t=0$ において $X=X_0$ が成り立ち、これらを解くことにより(3. 1)式に示す凝縮水量 Q と凝縮開始後の経過時間 t との関係により求めることができる。具体的には、(3. 1)式の結果から凝縮水が平衡に達する時間として評価し、凝縮水量が平衡に達する時間 T_2 は、凝縮水量 Q が漏えい量 Q_1 の90%以上となる平衡到達時間とする。

なお、0.23m³/h (1gpm) に相当する漏えいを検出し、警報を発信するための設定値は、凝縮水量Qが漏えい量Q₁の90%となる値以下に設定する。

(「図3-4 凝縮水量平衡時間算出の概略図」参照)

$$V \frac{dX}{dt} = Q_1 - Q_F (X - X_0)$$

$$Q = Q_F (X - X_0)$$

初期条件 : t=0, X=X₀

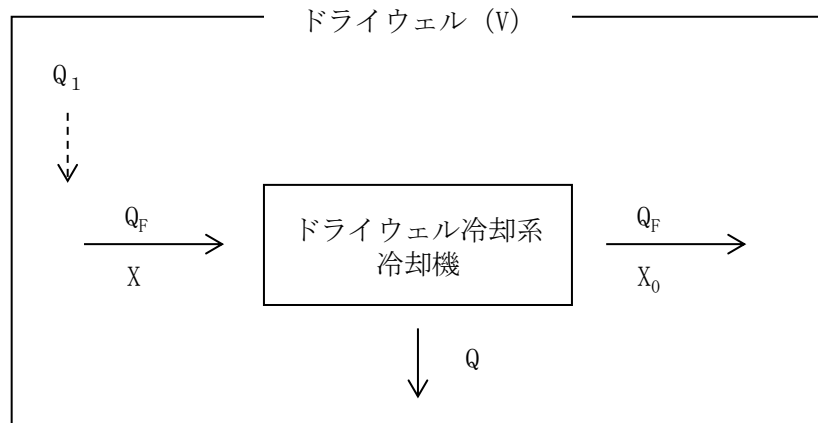


図3-4 凝縮水量平衡時間算出の概略図

$$Q = Q_1 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Q_F}{V} \cdot t\right) \right\} \dots\dots\dots (3. 1)$$

なお、本評価時間は、原子炉格納容器の体積が大きいため、徐々に変化するとともに、蒸気分の検出時間の評価として最も大きな値となることから、ドライウエル冷却系冷却機までの蒸気到達時間T₁及びドレン配管移送時間T₃の一部が包絡される。

- c. ドレン配管移送時間（ドライウエル冷却系冷却機～ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置）： T_3

ドライウエル冷却系冷却機にて凝縮した凝縮水はドレン配管を通過してドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置に導かれる。

本項では、凝縮水がドライウエル冷却系冷却機のドレン配管を經由し、ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置に到達するまでの時間を評価する。

ドライウエル冷却系冷却機からドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置までの呼び径 \square A のドレン配管（内径 \square m）には1/100のこう配が施されているため、ドレン配管を流れる平均流速 v_3 を、シェジー形の公式及びガンギェ・クッタの経験式（「新版機械工学便覧」（1987年4月 日本機械学会編）A5-11.8項より）から算出することにより、ドレン配管移送時間 T_3 を求める。（「図3-5 ドレン配管の概略図」参照）

なお、本計算は、ドライウエル冷却系冷却機からドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置までのドレン配管のうち、全長が最も長くなる配管長により評価している。

$$v = C \sqrt{m \cdot i}$$

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

$$T_3 = \frac{L_3}{v_3}$$

$$Q_D = v \cdot A \cdot 3600$$

$$m = A/L$$

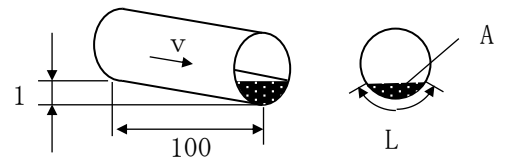


図3-5 ドレン配管の概略図

- d. ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出遅れ時間： T_4

ドレン配管に流入した凝縮水は、ドレン配管に設置したドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置で検出し、容積式流量検出器からのパルス信号を、中央制御室の演算装置を經由して指示部にて流量信号に変換し監視する。パルス信号積算値出力は1分ごとに更新されることから、変換器の出力は1分間のパルス信号積算値出力を次の1分間の出力まで保持する設計とする。また、1.35l/minに到達する前にパルス信号積算値が出力される可能性があることから、ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出遅れ時間を2分とする。

(2) ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間（蒸気分）

- a. ドライウェル冷却系冷却機までの蒸気到達時間（配管～ドライウェル冷却系冷却機）： T_1

RCPB配管からの漏えいした蒸気がドライウェル冷却系冷却機の冷却コイルに達し、冷却が開始されるまでの時間 T_1 は、(1)a. 項と同じ時間である。

- b. 凝縮水量が平衡に達する時間（凝縮水量平衡到達時間）： T_2

漏えい蒸気量とドライウェル冷却系冷却機における凝縮水量が同量になるまでの時間 T_2 は、(1)b. 項と同じ時間である。

- c. ドレン配管移送時間（ドライウェル冷却系冷却機～ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置）： T_3

凝縮水がドライウェル冷却系冷却機のドレン配管を經由し、ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置に到達するまでの時間 T_3 は、(1)c. 項と同じ時間である。

- d. ドレン配管移送時間（ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置～ドライウェル床ドレンサンプ）： T_5

ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置に導かれた凝縮水はドレン配管を通過してドライウェル床ドレンサンプに導かれる。

本項では、凝縮水がドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置のドレン配管を經由し、ドライウェル床ドレンサンプに到達するまでの時間を評価する。

ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置からドライウェル床ドレンサンプまでの呼び径 \square A のドレン配管（内径 \square m）には、ドライウェル床ドレンサンプに向かって 1/100 のこう配が施されているため、ドレン配管を流れる平均流速 v_5 を、(1)c. 項で用いたシェジ一形の公式及びガンギェ・クッタの経験式から算出することにより、ドレン配管移送時間 T_5 を求める。

$$T_5 = \frac{L_5}{v_5}$$

- e. 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

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によりドライウェル床ドレンサンプの水位を測定し、その水位の水位変化率を計算し、監視している。

水位変化率は3分周期で演算した4回分の水位平均値を用いて最小二乗法により計算するため、漏えい発生から少なくとも3周期分の水位測定時間（9分）＋水位平均値演算時間（25秒）が必要となる。また、演算開始とドレン流入開始のタイミングによっては検出できないことも考えられるため、1周期分（3分）多い時間を考慮する必要がある。

これより、検出時間は12分25秒となるが、保守的に13分後に検出可能と設定する。
 以上より、演算時間 T_9 は13分とする。

(3) ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間（液体分）

a. 保温材から漏れ出るまでの時間（保温材内滞留時間）： T_6

(a) 金属保温材

原子炉冷却材配管は保温材（金属保温）を設置しており、保温材から漏れい水が漏れ出るまでの時間 T_6 は、保守的に漏れい水が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（保温材は円周方向に一体構造のものではなく、独立に2分割された金属保温を止め合わせて取り付けられていることから漏れい水は保温材内に入り込むとは考えにくい及安全側の評価をしている。）に接合部から漏れ出ると仮定し、次式により保温材内滞留時間 T_6 を求める。（「図3-6 保温材の概略図」参照）

なお、本計算は、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。

$$T_6 = \frac{\left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \cdot L_6 \right\}}{Q_2}$$

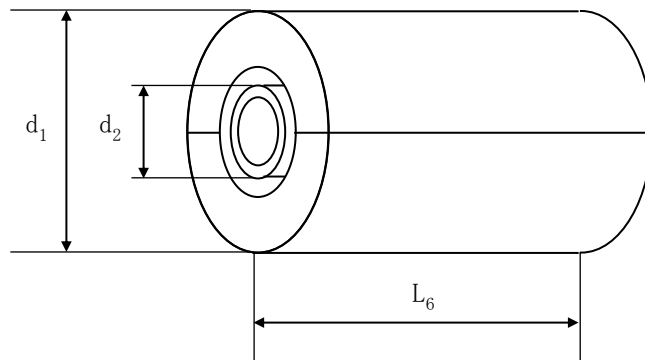


図3-6 保温材の概略図

(b) 一般保温材

原子炉冷却材配管は保温材（一般保温）を設置しており，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（流れ出すまでの時間は，液体分が保温材の2分割の下半分の体積の100%分吸収された後，2分割された外装板の継ぎ目から漏れ出ると仮定し，評価方法は金属保温材の場合と同等とする）に接合部から漏れ出ると仮定し，次式により保温材内滞留時間 T_6 を求める。（「図3-6 保温材の概略図」参照）

なお，本計算は，原子炉冷却材を内包する配管の一般保温材のうち，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。

$$T_6 = \frac{\left\{ \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \cdot L_6 \right\}}{Q_2}$$

b. ドレン配管入口までの到達時間（保温材～ドレン配管入口）： T_7

保温材からの漏えい水はドライウェル床面に落下し，床面を通過してドレン配管入口に導かれる。

本項では，漏えい水がドライウェル床面を経由し，ドレン配管入口に到達するまでの時間を評価する。

ドライウェル床面にはこう配がないことから，漏えい水は床面に均一に広がり水位上昇に伴いドレン配管へ流入する。ドライウェル床は，漏えい水の落下地点からドレン配管入口までの長さを堤頂幅とする広頂ぜきとなることから，ゴビンダ ラオの式（「土木工学ハンドブック」1986年1版10刷 土木学会編）から水位と流入量の関係を求めることができる。具体的には，(3.2)～(3.5)式から単位時間当たりのドライウェル床への流入量と水位からドレン配管への流出量を算出し，ドレン配管への流出量が平衡に達する時間 T_7 は，ドレン配管への流出量が漏えい量 Q_2 の75%以上となる平衡到達時間とする。（「図3-7 ドライウェル床面の概略図」参照）

なお，本計算はドライウェル床面のうち，ドレン配管入口から最も離れている位置を落下点として設定し，評価している。

$$Q_0(t) = C_7 \cdot B \cdot h(t)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (3. 2)$$

$$C_7 = 1.642 \cdot (h(t)/L_7)^{0.022} \dots\dots\dots (3. 3)$$

$$h(t) = Q_i(t)/A_7 \dots\dots\dots (3. 4)$$

$$Q_i(t) = Q_i(t - \Delta T) + Q_2 \cdot \Delta T - Q_0(t) \dots\dots\dots (3. 5)$$

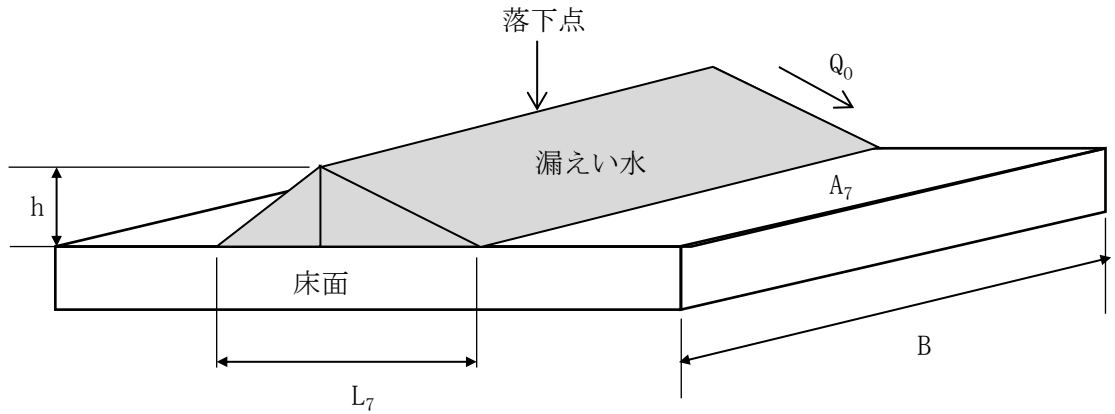


図3-7 ドライウェル床面の概略図

c. 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

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呼び径 \square A のドレン配管（内径 \square m）には，ドライウェル床ドレンサンプに向かって1/100のこう配が施されているため，ドレン配管を流れる平均流速 v_8 を，(1)c. 項で用いたシェージー形の公式及びガンギェ・クッタの経験式から算出することにより，液体分のドレン配管移送時間 T_8 を求める。

なお，本計算は，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のうち，全長が最も長くなる配管長により評価している。

$$T_8 = \frac{L_8}{v_8}$$

d. 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

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 は，(2)e. 項と同じ時間である。

3.3.5 検出時間

「3.3.1 検出時間の評価方法」及び「3.3.2 漏えい水が蒸気になる割合」を踏まえて検出時間の算出を行った結果を「図3-8 漏えい検出時間の評価結果」及び「表3-6 漏えい検出時間の整理表」に示す。蒸気分としてドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置により漏えい量を検出するまでの時間 ($T_1+T_2+T_3+T_4$) は36分である。また、液体分としてドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置により漏えい量を検出するまでの時間は、「表3-6 漏えい検出時間の整理表」に示すように、ドライウエル冷却系冷却機からの流入時間にドライウエル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間を加算した時間 ($T_1+T_2+T_3+T_5+T_9$)、ドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間 ($T_6+T_7+T_8+T_9$) のうち最大時間としても58分で検出可能であることから、1時間以内に検出できる設計である。

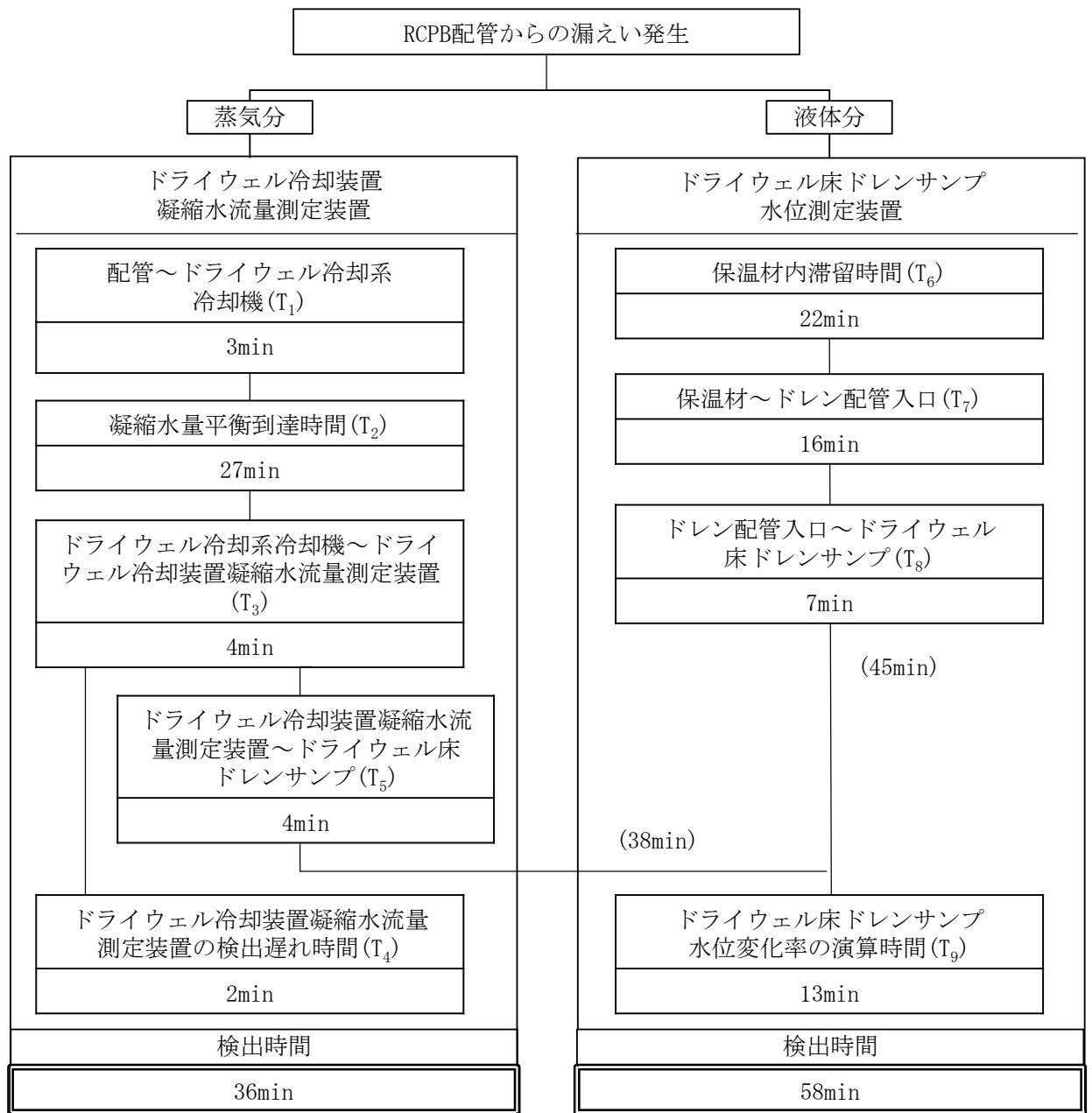


図3-8 漏えい検出時間の評価結果

表3-6 漏えい検出時間の整理表(1/4)

項目		計算パラメータ		評価時間 (min)
ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出時間	a. ドライウエル冷却系冷却機までの蒸気到達時間 (配管～ドライウエル冷却系冷却機) : T ₁ (min)	V: ドライウエル内自由体積 (m ³)	7900	T ₁ =3
		Q _G : ドライウエル冷却系送風機風量 (m ³ /min)	<input type="text"/>	
	b. 凝縮水量が平衡に達する時間 (凝縮水量平衡到達時間) : T ₂ (min)	V: ドライウエル内自由体積 (m ³)	7900	T ₂ =27* ³
		Q _F : 除湿に寄与するドライウエル冷却系冷却機風量 (m ³ /min)	<input type="text"/>	
		Q ₁ : 漏えい量 (蒸気分) (ℓ/min)	1.5	
	c. ドレン配管移送時間 (ドライウエル冷却系冷却機～ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置) : T ₃ (min)	Q: ドライウエル冷却系冷却機での凝縮水量 (ℓ/min)	(数式)	T ₃ =4
		v ₃ : ドレン配管を流れる漏えい水の平均流速 (m/s)	0.159* ⁴	
		C: 流速係数	25.8* ⁴	
		i: こう配	0.01	
		n: 粗度係数	0.01* ⁵	
A: 流路断面積 (m ²)		0.000137* ⁴		
Q _D : ドレン配管を流れる漏えい水の流量 (m ³ /h)		0.087		
m: 平均深さ (m)	0.00378* ⁴			
L: ドレン配管のぬれ縁長さ (m)	0.0362* ⁴	T ₄ =2		
	L ₃ : ドレン配管の長さ (m)		37	
	—* ⁶			
d. ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置の検出遅れ時間 : T ₄ (min)			T ₄ =2	
検出時間合計	T ₁ +T ₂ +T ₃ +T ₄		36	

注記*1: ドライウエル冷却系冷却機4台分の風量

*2: 除湿に寄与する下部ドライウエル冷却系冷却機2台分の風量

*3: 凝縮水量Qが漏えい量 (蒸気分) Q₁の90%に到達する時間として算出 (「図3-9 凝縮水量が平衡に達する時間について」参照)

*4: 収束計算によって得られる値

*5: Manning-Stricklerの式を用いて評価した結果及び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設定した値

*6: 計算パラメータなし

表3-6 漏えい検出時間の整理表 (2/4)

項目		計算パラメータ		評価時間 (min)	
ドライウエル床ドレンサンプル水位測定装置の検出時間(蒸気分)	e. ドライウエル冷却系冷却機までの蒸気到達時間(配管～ドライウエル冷却系冷却機) : T_1 (min)	a. 項と同じ	a. 項と同じ	$T_1=3$	
	f. 凝縮水量が平衡に達する時間(凝縮水量平衡到達時間) : T_2 (min)	b. 項と同じ	b. 項と同じ	$T_2=27$	
	g. ドレン配管移送時間(ドライウエル冷却系冷却機～ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置) : T_3 (min)	c. 項と同じ	c. 項と同じ	$T_3=4$	
	h. ドレン配管移送時間(ドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置～ドライウエル床ドレンサンプル) : T_5 (min)	v_5 : ドレン配管を流れる漏えい水の平均流速 (m/s)		0.149 ^{*1}	$T_5=4$
		C: 流速係数		25.1 ^{*1}	
		i: こう配		0.01	
		n: 粗度係数		0.01 ^{*2}	
		A: 流路断面積 (m ²)		0.000146 ^{*1}	
		Q_D : ドレン配管を流れる漏えい水の流量 (m ³ /h)		0.087	
		m: 平均深さ (m)		0.00351 ^{*1}	
L: ドレン配管のぬれ縁長さ (m)		0.0417 ^{*1}			
L_5 : ドレン配管の長さ (m)		33			
i. ドライウエル床ドレンサンプル水位変化率の演算時間 : T_9	— ^{*3}			$T_9=13$	
検出時間合計	$T_1+T_2+T_3+T_5+T_9$			51	

注記*1: 収束計算によって得られる値

*2: Manning-Stricklerの式を用いて評価した結果及び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設定した値

*3: 計算パラメータなし

表3-6 漏えい検出時間の整理表 (3/4)

項目		計算パラメータ		評価時間 (min)
ドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間(液体分)	j. 保温材から漏れ出るまでの時間(保温材内滞留時間) : T_6 (min)	d_1 : 保温材外径 (m)	0.738	$T_6=22$
		d_2 : 配管外径 (m)	0.508	
		L_5 : 保温材最大長さ (m)	0.450	
		Q_2 : 漏えい量(液体分) (ℓ/min)	2.3	
	k. ドレン配管入口までの到達時間(保温材～ドレン配管入口) : T_7 (min)	Q_2 : 漏えい量(液体分) (ℓ/min)	2.3	$T_7=16^{*3}$
		Q_i : ドライウエル床面の滞留量 (m^3)	(数式)	
		C_7 : 流量係数	(数式)	
		B : 越流幅 (m)	12.5	
		h : 越流水深 (m)	(数式)	
		Q_0 : ドレン配管への流出量 (m^3/h)	(数式)	
		L_7 : 堤頂幅 (m)	17	
	l. ドレン配管移送時間(ドレン配管入口～ドライウエル床ドレンサンプ) : T_8 (min)	v_8 : ドレン配管を流れる漏えい水の平均流速 (m/s)	0.129/ 0.167 ^{*1,4}	$T_8=7$
		C_8 : 流速係数	23.6/26.4 ^{*1,4}	
i : こう配		0.01		
n : 粗度係数		0.01 ^{*2}		
A_8 : 流路断面積 (m^2)		0.00012/ 0.00018 ^{*1,4}		
Q_D : ドレン配管を流れる漏えい水の流量 (m^3/h)		0.053/ 0.107 ^{*4}		
m : 平均深さ (m)		0.00300/ 0.00399 ^{*1,4}		
L : ドレン配管のぬれ縁長さ (m)		0.0384/ 0.0447 ^{*1,4}		
m. ドライウエル床ドレンサンプ水位変化率の演算時間 : T_9	L_8 : ドレン配管の長さ (m)	32/16 ^{*4}	$T_9=13$	
	i. 項と同じ			
検出時間合計		$T_6+T_7+T_8+T_9$		58

注記*1 : 収束計算によって得られる値

*2 : Manning-Stricklerの式を用いて評価した結果及び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設定した値

*3 : 平衡流量が漏えい量(液体分) Q_2 の75%に到達する時間として算出

*4 : 2つのドレン配管入口から流入した後に1本のドレン配管に合流することを想定し、合流前後のパラメータをそれぞれ記載(合流前/合流後)

表3-6 漏えい検出時間の整理表 (4/4)

項目		評価時間 (min)
ドライウエル床ドレンサンプ 水位変化率検出時間	ドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間 (蒸気分) ($T_1+T_2+T_3+T_5+T_9$)	51
	ドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置の検出時間 (液体分) ($T_6+T_7+T_8+T_9$)	58
検出時間	上記検出時間の最大時間	58

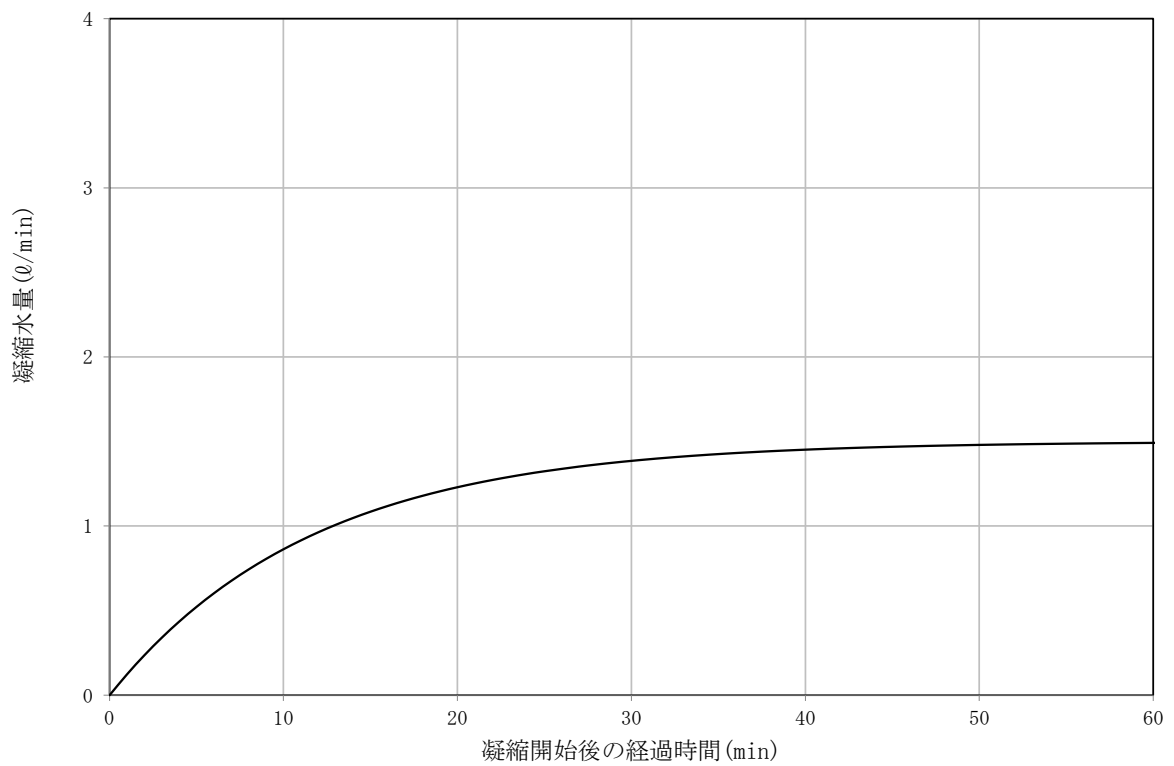


図3-9 凝縮水量が平衡に達する時間について

3.3.6 原子炉冷却材圧力バウンダリの範囲の拡大が検出時間に与える影響

原子炉冷却材圧力バウンダリの範囲の拡大が検出時間に与える影響を評価するために、原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲から漏えいが発生した場合の漏えい時間が、蒸気分及び液体分のそれぞれについて「表3-6 漏えい検出時間の整理表」で整理した検出時間に包絡されているかを確認する。

(1) 蒸気分の漏えい

原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲からの漏えいのうち蒸気分は、保温材継目より直ちに保温材外に出るため、従前のRCPB配管からの漏えいと同様にドライウエル冷却系冷却機で冷却・凝縮し、ドレン配管に設置したドライウエル冷却装置凝縮水流量測定装置により検出される。よって、「表3-6 漏えい検出時間の整理表」におけるRCPB配管からの漏えい水（蒸気分）の検出時間である $T_1+T_2+T_3+T_5+T_9=51$ 分に包絡される。

(2) 液体分の漏えい

原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲からの漏えいのうち液体分は、従前のRCPB配管からの漏えいと同様に保温材で一定時間滞留した後に、ドライウエル床に漏えいする。その後、ドレン配管からドライウエル床ドレンサンプへ到達した後に、ドライウエル床ドレンサンプ水位測定装置にて検出される。

「表3-6 漏えい検出時間の整理表」におけるRCPB配管からの漏えい水（液体分）の検出時間は、原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲を含めた原子炉冷却材配管のうち、最も保温材体積の大きい箇所かつ最も移送時間が長くなる経路により漏えい検出時間を評価したものであり、原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲からの漏えいのうち液体分についても、従前のRCPB配管からの漏えい水（液体分）の検出時間である $T_6+T_7+T_8+T_9=58$ 分に包絡される。

(3) 評価結果

(1)(2)より、本評価においては原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲も含め、保守的な条件を設定していることから、原子炉冷却材圧力バウンダリの拡大範囲での漏えいを検出する時間は、「表3-6 漏えい検出時間の整理表」で整理した検出時間に包絡される。

4. 漏えいを監視する装置の計測範囲及び警報動作範囲

4.1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の計測範囲及び警報動作範囲

ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の計測範囲は、RCPB配管からのドライウェル内への漏えい流体の全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) に相当する凝縮水を計測できるよう $0\sim 5\text{l}/\text{min}$ を設定する。

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 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\text{l}/\text{min}$) の蒸気分の漏えいに相当する流量 ($1.5\text{l}/\text{min}$) の90% ($1.35\text{l}/\text{min}$) になる前に、中央制御室へドライウェル冷却装置凝縮水流量大の警報表示を行う。なお、警報動作流量以上の流量では、警報表示状態を継続する。（「図4-1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の計測範囲」参照）

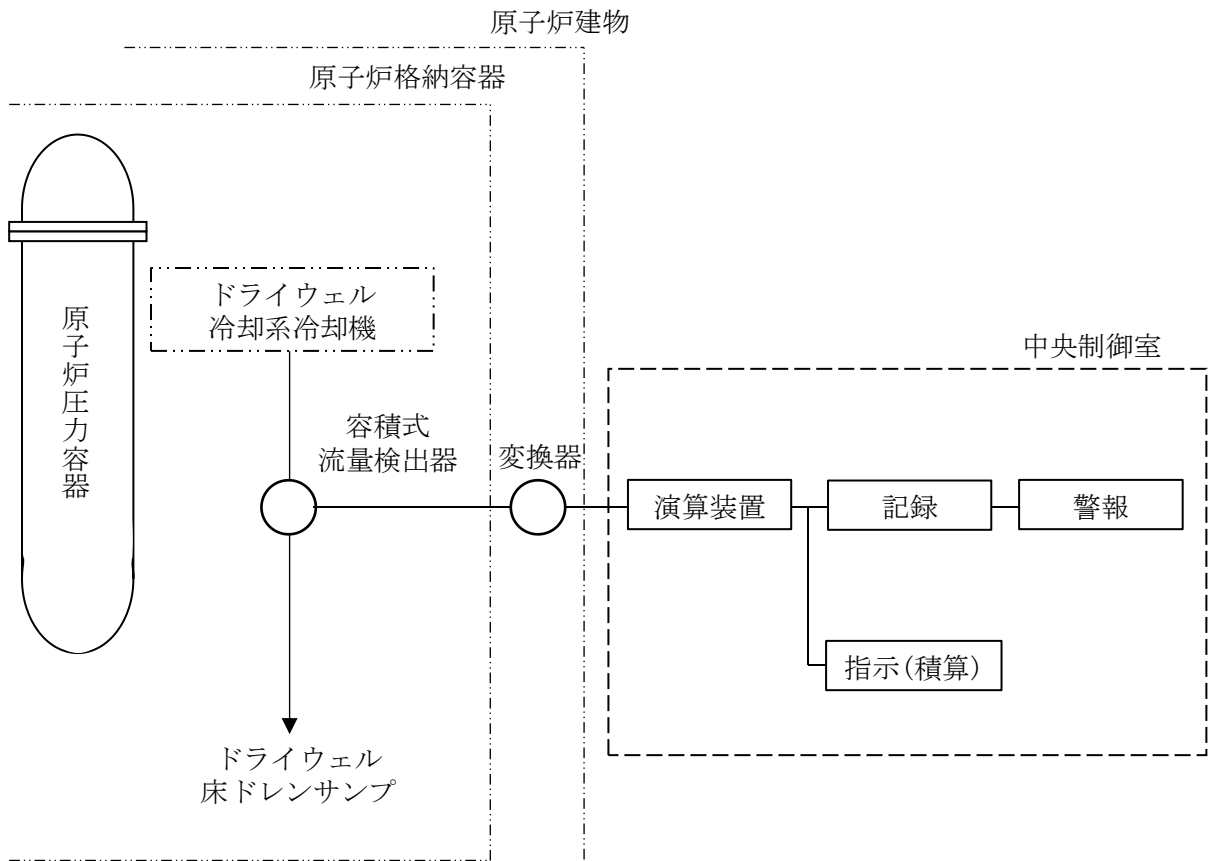


図4-1 ドライウェル冷却装置凝縮水流量測定装置の計測範囲

4.2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測範囲及び警報動作範囲

ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測範囲は、RCPB配管からのドライウェル内への漏えい流体の全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\ell/\text{min}$) の流入量（ドライウェル床ドレンサンプにおける1時間の水位上昇は 74.5mm に相当）が計測できるよう $0\sim 1250\text{mm}$ を設定する。

ドライウェル床ドレンサンプ水位変化率の演算結果による警報動作範囲は、ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測範囲によらず設定可能であり、全漏えい量 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ ($3.8\ell/\text{min}$) に相当する流量の 81% ($3.08\ell/\text{min}$) になる前に、中央制御室へドライウェル床ドレンサンプ流量大の警報表示を行う。なお、警報動作流量以上の流量では、警報表示状態を継続する。（「図4-2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測範囲」参照）

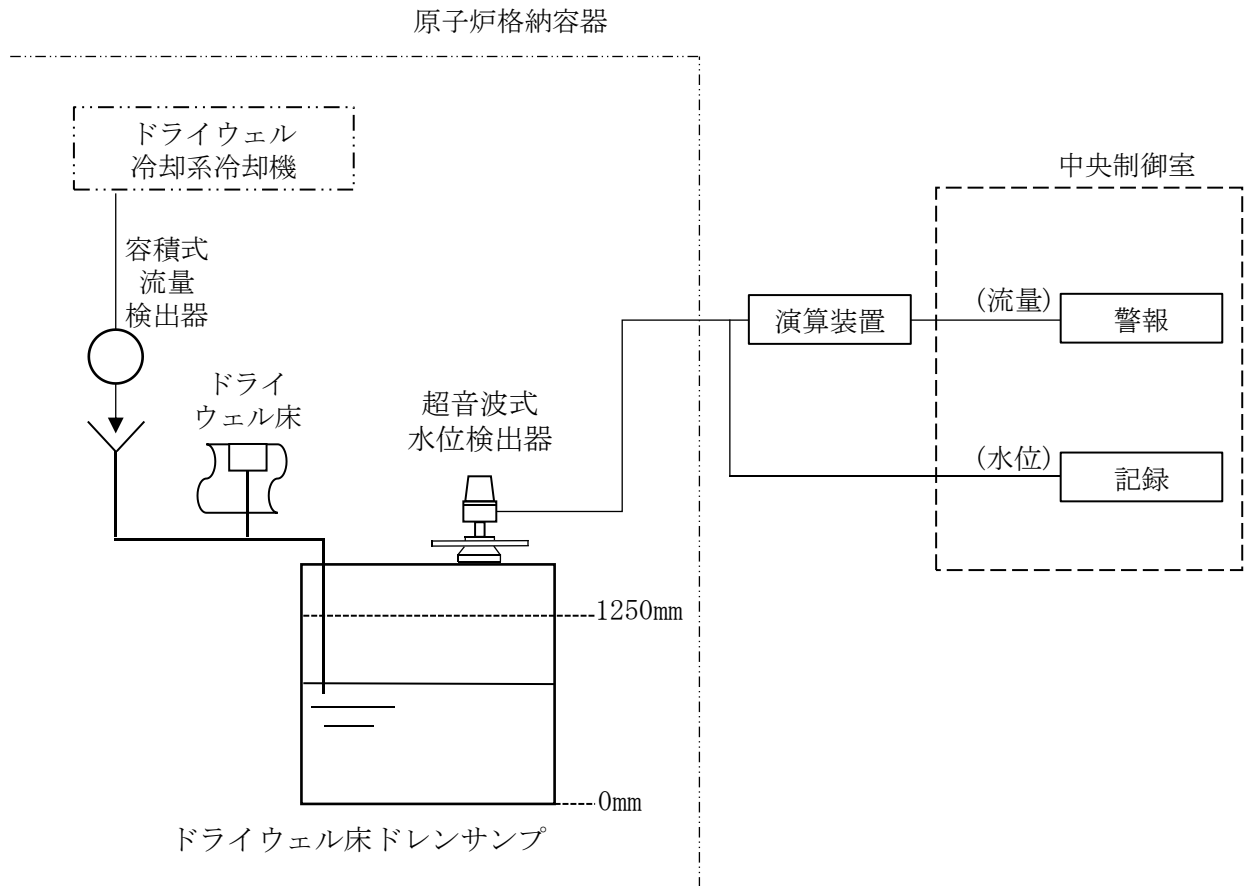


図4-2 ドライウェル床ドレンサンプ水位測定装置の計測範囲