

# 「もんじゅ」廃止措置計画の変更内容 (模擬燃料体の部分装荷)

## 解析手法・解析モデルについて 改正1

2019年12月9日

日本原子力研究開発機構 (JAEA)

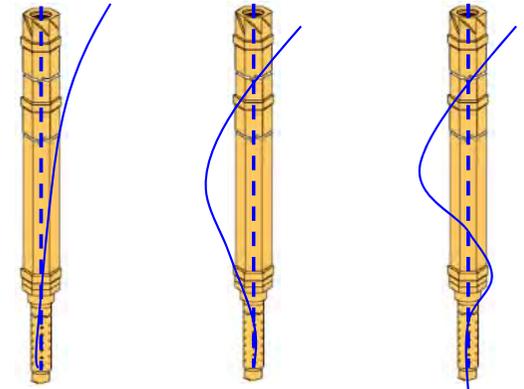
## ◎ 応答解析

- ・モーダル解析により運動方程式を解く  
(計算の効率化)
- ・時刻歴解析

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F]$$

## ◎ 炉心構成要素の応答挙動 = 剛体運動 + 弾性運動

- ・重心の剛体運動のうち、鉛直軸回りの回転運動は拘束とみなす。  
水平：2自由度（並進、回転）×水平2方向 = 4自由度  
鉛直：1自由度（並進）
- ・弾性運動は、1次～3次までの低振動モードを考慮する。  
水平：梁の1次～3次モード×水平2方向 = 6自由度



1次～3次の弾性変形を考慮

## 2. 変位、速度、加速度マトリクス

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F]$$

炉心構成要素本数

炉心構成要素本数

炉心構成要素本数

$$[X] = \left\{ \begin{array}{ccc} x_{1,1} & x_{2,1} & \dots \\ x_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n,1} & \dots & x_{n,m} \\ X_{G,1} & & X_{G,m} \\ \theta_{GX,1} & \dots & \theta_{GX,m} \\ y_{1,1} & y_{2,1} & \dots \\ y_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ y_{n,1} & \dots & y_{n,m} \\ Y_{G,1} & \dots & Y_{G,m} \\ \theta_{GY,1} & \dots & \theta_{GY,m} \end{array} \right\}, \quad [\dot{X}] = \left\{ \begin{array}{ccc} \dot{x}_{1,1} & \dot{x}_{2,1} & \dots \\ \dot{x}_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{x}_{n,1} & \dots & \dot{x}_{n,m} \\ \dot{X}_{G,1} & & \dot{X}_{G,m} \\ \dot{\theta}_{GX,1} & \dots & \dot{\theta}_{GX,m} \\ \dot{y}_{1,1} & \dot{y}_{2,1} & \dots \\ \dot{y}_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \dot{y}_{n,1} & \dots & \dot{y}_{n,m} \\ \dot{Y}_{G,1} & \dots & \dot{Y}_{G,m} \\ \dot{\theta}_{GY,1} & \dots & \dot{\theta}_{GY,m} \end{array} \right\}, \quad [\ddot{X}] = \left\{ \begin{array}{ccc} \ddot{x}_{1,1} & \ddot{x}_{2,1} & \dots \\ \ddot{x}_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \ddot{x}_{n,1} & \dots & \ddot{x}_{n,m} \\ \ddot{X}_{G,1} & & \ddot{X}_{G,m} \\ \ddot{\theta}_{GX,1} & \dots & \ddot{\theta}_{GX,m} \\ \ddot{y}_{1,1} & \ddot{y}_{2,1} & \dots \\ \ddot{y}_{2,1} & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ \ddot{y}_{n,1} & \dots & \ddot{y}_{n,m} \\ \ddot{Y}_{G,1} & \dots & \ddot{Y}_{G,m} \\ \ddot{\theta}_{GY,1} & \dots & \ddot{\theta}_{GY,m} \end{array} \right\}$$

X方向 1次モードの一般変位  
 X方向 2次モードの一般変位  
 X方向 3次モードの一般変位  
 Y方向 1次モードの一般変位  
 Y方向 2次モードの一般変位  
 Y方向 3次モードの一般変位  
 X方向 重心の絶対変位  
 X軸 重心回りの回転  
 Y方向 重心の絶対変位  
 Y軸 重心回りの回転  
 Z方向 重心の絶対変位

### 3. 質量マトリクス

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F]$$

モード質量

重心の慣性力が  
振動モードに及ぼす影響

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{x1} & 0 \\ 0 & M_{x2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_{xn} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{y1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{y2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_{yn} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{x1}\beta_{x1} & M_{x2}\beta_{x2} & M_{xn}\beta_{xn} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{y1}\beta_{y1} & M_{y2}\beta_{y2} & M_{yn}\beta_{yn} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{x1}\beta_{x1}'' & M_{x2}\beta_{x2}'' & M_{xn}\beta_{xn}'' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_{y1}\beta_{y1}'' & M_{y2}\beta_{y2}'' & M_{yn}\beta_{yn}'' & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_z \end{bmatrix}$$

振動モードの慣性力が  
重心に及ぼす影響

重心の質量、  
回転慣性モーメント

$M_n$  :  $n$  次のモード質量

$$M_n = \int_0^h \lambda_{n(z)} \cdot m_{o(z)} \cdot \lambda_{n(z)} dz$$

$\lambda_{n(z)}$  : 炉心構成要素の  $n$  次固有振動モード

$m_{o(z)}$  : 質量の高さ方向分布

$z$  : エントランスノズル下端からの高さ方向距離

$h$  : 炉心構成要素の全長

$\beta_1 \sim \beta_n$ 、 $\beta_1'' \sim \beta_n''$  は次のように表される。

$$\beta_n = \frac{\int_0^h m_{o(z)} \cdot \lambda_{n(z)} dz}{\int_0^h m_{o(z)} \cdot \lambda_{n(z)}^2 dz} \quad n \text{ 次の刺激係数 (水平動)}$$

$$\beta_n'' = \frac{\int_0^h m_{o(z)} \cdot (z - z_k) \cdot \lambda_{n(z)} dz}{\int_0^h m_{o(z)} \cdot \lambda_{n(z)}^2 dz} \quad n \text{ 次の刺激係数 (回転)}$$

要素のモード解析

- ・振動モード
- ・固有振動数
- ・ $n$  次のモード質量



刺激係数 (並進、回転)

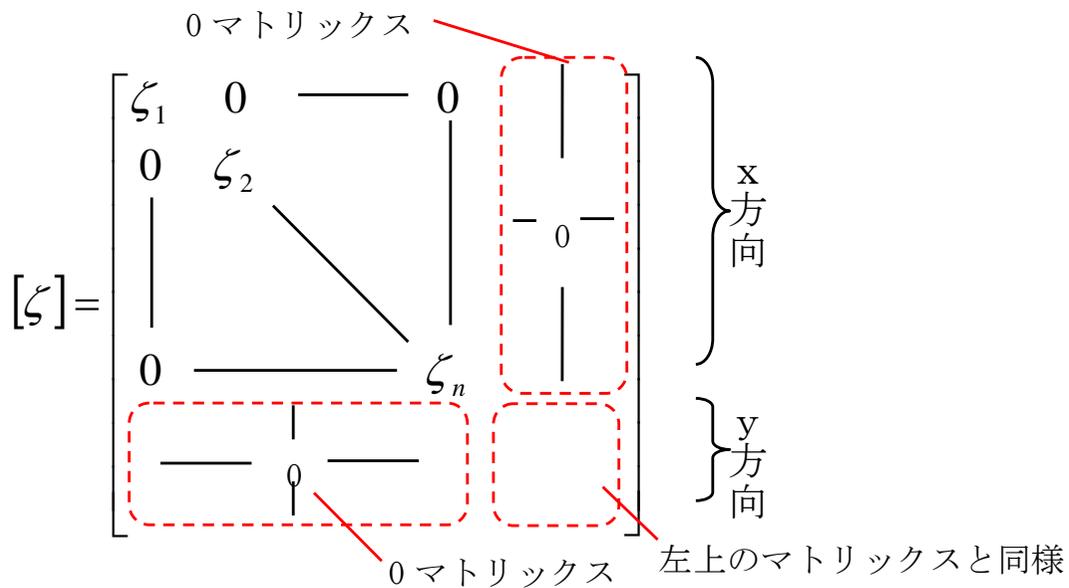
$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F]$$

要素のモード解析  
 ・n次の固有振動数  
 ・n次のモード減衰  
 ・質量マトリクス

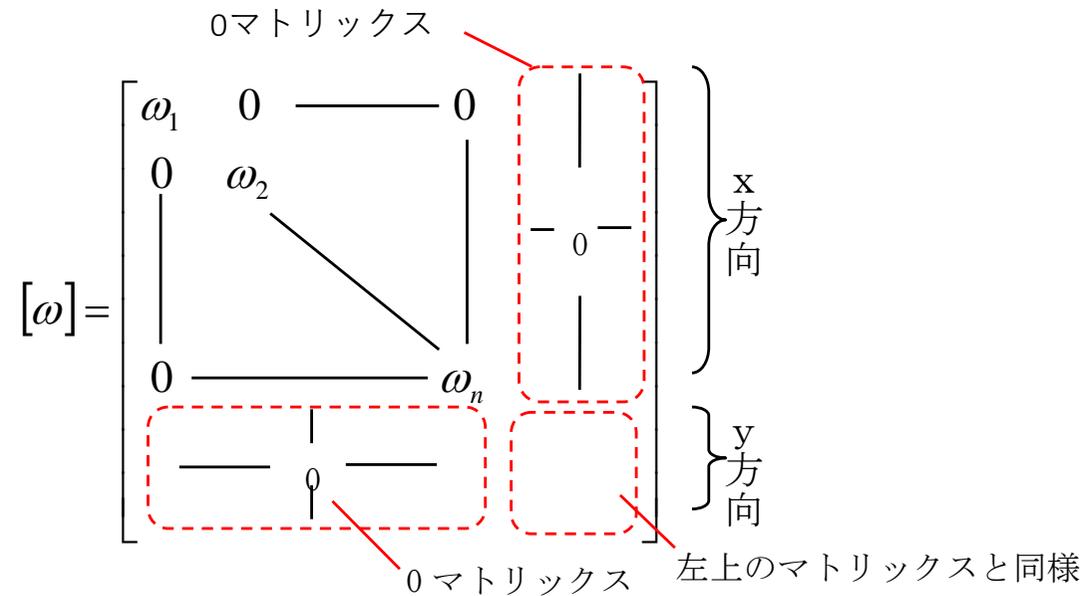
↓  
 減衰、剛性マトリクス

$$[C] = 2 \cdot [M][\zeta][\omega]$$

$$[K] = [\omega][M][\omega]$$

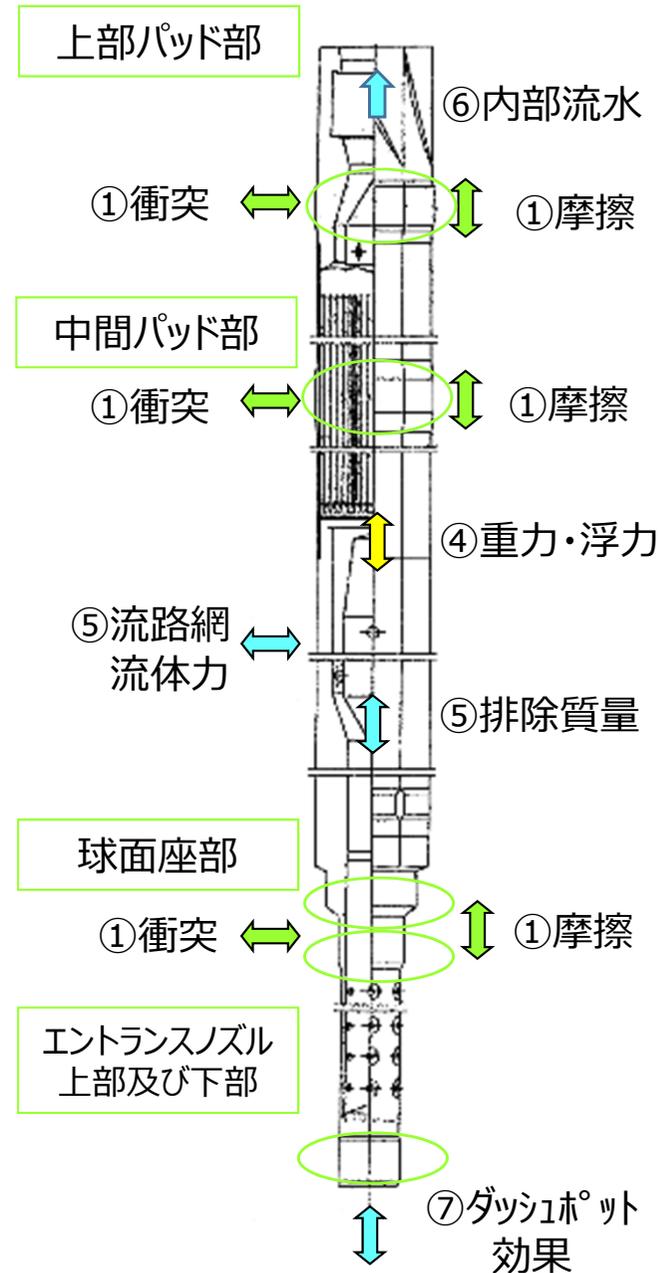


$\zeta_n$  : n次のモード減衰



$\omega_n$  : n次の固有振動数

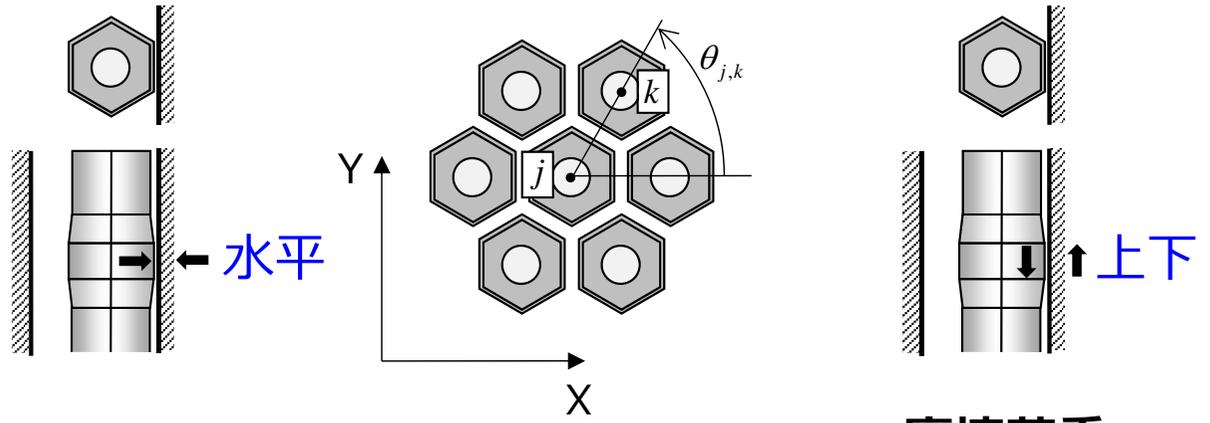
# 5. 考慮する外力



	影響因子	影響の大きさ	モデル化
①	衝突荷重・摩擦力の影響	パッド部の衝突荷重は数万ニュートンのオーダーであり影響は大きい	パッド部と同様にエントランスノズル部、球面座部衝突荷重、摩擦力を外力として考慮する
②	炉心構成要素に対する外力作用点と重心のずれ	隣接要素に回転を拘束されるため、偏心による発生するモーメントの影響は小さい	不要 (軸方向の回転自由度は拘束)
③	エントランスノズル部を支点とした振れによる遠心力の影響	炉心構成要素に作用する遠心力は、重力の高々0.7%程度なので影響は小さい	不要
④	重力、浮力による影響	浮力は重力の約12%であり影響は大きい	見かけ上の重力加速度を用いて考慮する
⑤	流体排除質量の影響	外部流体の流体排除質量は、炉心構成要素の約20%程度なので影響は大きい	水平方向は流路網による流体力として考慮する。鉛直方向には外力として考慮する
⑥	内部流水による荷重	内部流水による浮き上がり荷重は、重力に対し約40%程度なので影響は大きい	外部荷重として適切に考慮する
⑦	エントランスノズル下部空間での上下方向の流体力	エントランスノズル下部空間の形状によるダッシュポット効果が大きくなる可能性がある(もんじゅではこの力は働かない)	外部荷重として適切に考慮する
⑧	流体による炉心構成要素壁面せん断力の影響	炉心構成要素の自重に比べ小さいので影響は小さい	不要
⑨	炉心構成要素の先端部が受ける流体力	流体抗力は自重の高々0.5%なので影響は小さい	不要

# 5. 炉心構成要素に作用する外力 衝突部①～⑥

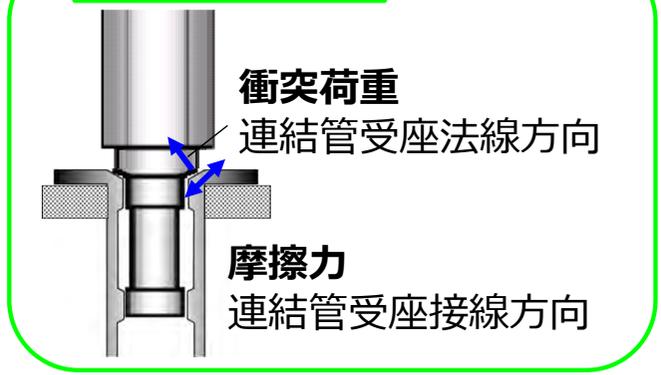
## ①②パッド部



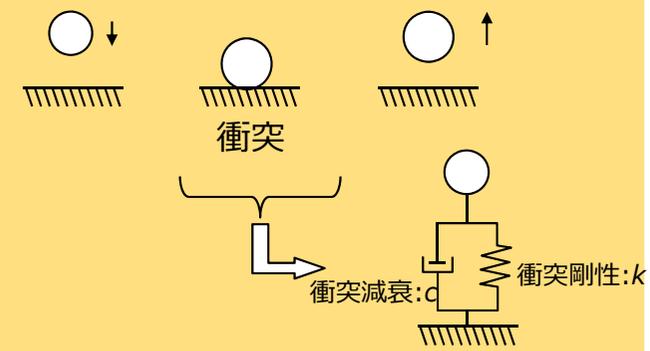
**衝突荷重**  
(水平方向：パッド面垂直)

**摩擦荷重**  
(上下方向)

## ⑤⑥球面座



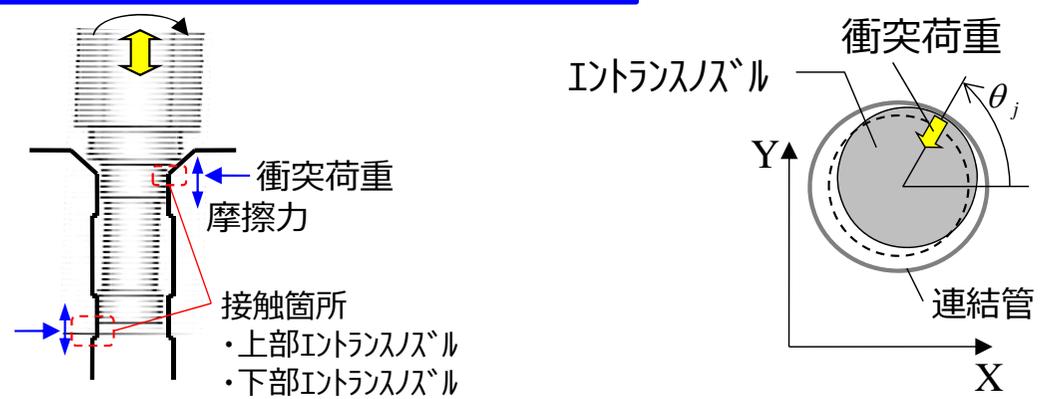
### 衝突部のモデル化



反発係数に合わせて衝突剛性・衝突減衰を設定。

衝突荷重： $F_i = kx + cv$   
 摩擦荷重： $F_f = \mu F_i$   
 (衝突荷重が押付力)  
 $\mu$ ：摩擦係数

## ③④エントランスノズル部



**摩擦荷重**  
(上下方向)

**衝突荷重**  
(水平方向：衝突点から法線)

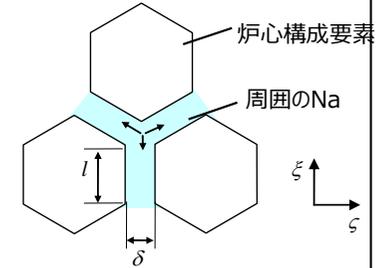
## 流路網理論の仮定

- 内部流体は非圧縮、非粘性の完全流体
- 流体の上下方向の流れによる影響は小さい
- 流路網間の隙間はどこも均等であり、微小振動による流路網の隙間の変化は無視できる

オイラーの運動方程式が成り立つ

$$-\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial p}{\partial \xi} = \frac{dv}{dt}$$

$\rho_L$  : 液体密度  
 $p$  : 液体圧力  
 $v$  : 流速  
 $(\xi, \zeta)$  : 流路における直角座標系



$$p|_{\xi=0} - p|_{\xi=l} = \frac{\rho_L l}{\delta} \dot{Q}|_{\xi=0} - \frac{\rho_L l^2}{2\delta} \ddot{\delta}$$

$$f = \int_0^l p d\xi = \frac{l}{2} (p|_{\xi=0} + p|_{\xi=l}) - \frac{\rho_L l^3}{12\delta} \ddot{\delta}$$

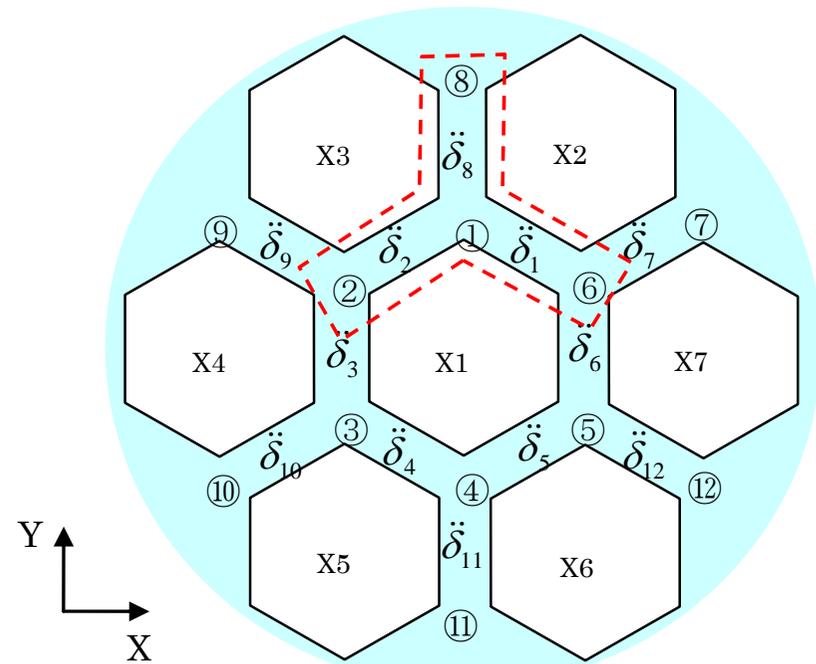
## 流路網間の相互作用

内部流体の圧力バランスの計算

$$3p_1 - p_6 - p_2 - p_8 = -\frac{\rho \cdot l_w^2}{2 \cdot \delta} (\ddot{\delta}_1 + \ddot{\delta}_2 + \ddot{\delta}_8)$$

圧力変化による流体力  $f_1$  の算出

$$f_1 = \int_{\text{⑥}}^{\text{①}} p \cdot d\xi = \frac{l_w}{2} (p_6 + p_1) - \frac{\rho_L \cdot l_w^3}{12 \cdot \delta} \ddot{\delta}_1$$



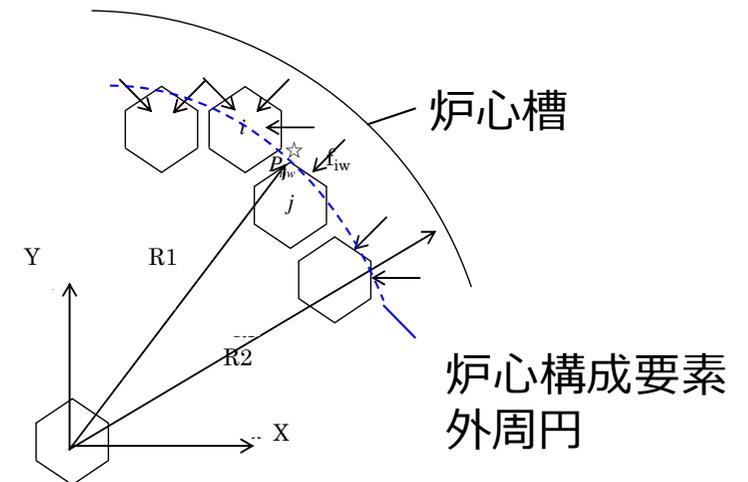
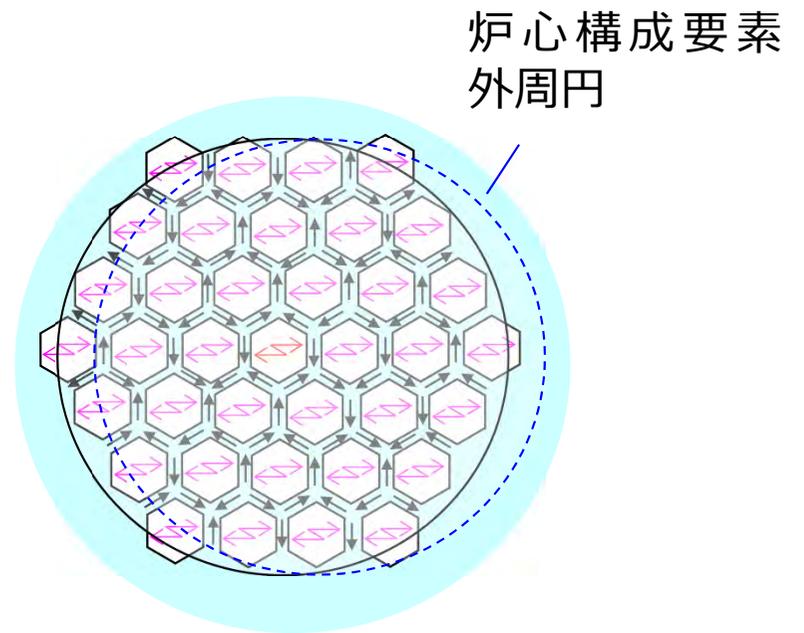
## 最外周のモデル化

最外層の炉心構成要素の周囲の圧力は、炉心構成要素全体をひとつの円筒とみなしたときの圧力分布と等しくなると考える。

$$f_{iw} = \frac{\rho_L l R_{ij1}^2}{R_2^2 - R_{ij1}^2} \left[ \left( r_{iw} + \frac{R_2^2}{r_{iw}} \right) \cos \theta_{iw}, \left( r_{iw} + \frac{R_2^2}{r_{iw}} \right) \sin \theta_{iw} \right] \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{Y}_1 \end{bmatrix}$$

$$- \frac{\rho_L l R_2^2}{R_2^2 - R_{ij1}^2} \left[ \left( r_{iw} + \frac{R_{ij1}^2}{r_{iw}} \right) \cos \theta_{iw}, \left( r_{iw} + \frac{R_{ij1}^2}{r_{iw}} \right) \sin \theta_{iw} \right] \begin{bmatrix} \ddot{X}_2 \\ \ddot{Y}_2 \end{bmatrix}$$

$$r_{iw} \cong \sqrt{x_i^2 + y_i^2} + \frac{3}{4}l, \quad \theta_{iw} \cong \tan^{-1} \left( \frac{y_i}{x_i} \right)$$



炉心構成要素の高さ方向 各断面で流体力を計算

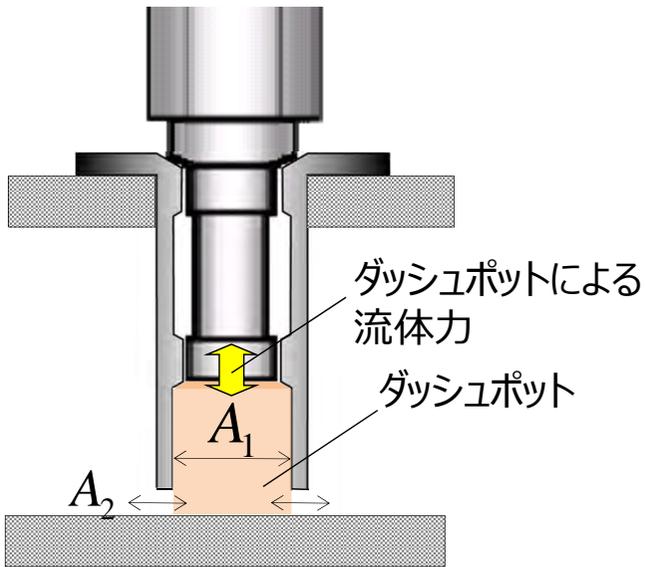
## ⑧ ダッシュポットによる流体力

$$f_{mr} = -\zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v^2$$

$\zeta$  : 圧損係数

$\rho$  : 冷却材の密度

$v = \frac{A_1}{A_2} \cdot (\dot{Z}_G - \dot{Z}_0)$  : 流路の流速



流路孔の流れにより差圧が発生し、運動を妨げる力が発生する<sup>1)</sup>。

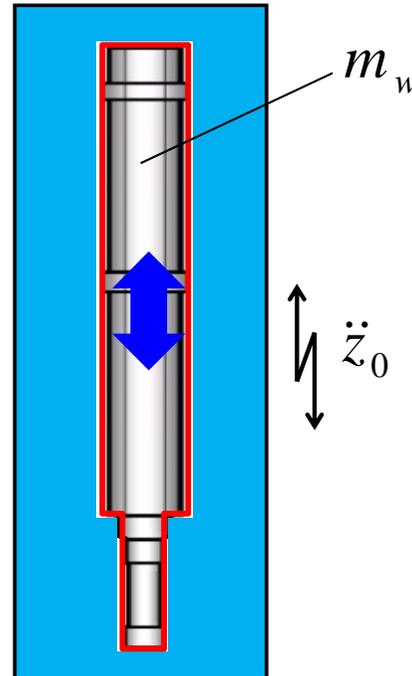
1) もんじゅではこの流体力は発生しない

## ⑨ 排除質量による流体慣性力

$$F = m_w \cdot \ddot{z}_0$$

$m_w$  : 炉心構成要素が排除した水の質量

$\ddot{z}_0$  : 上下加振加速度



排除した冷却材質量の慣性力が発生する<sup>2)</sup>。

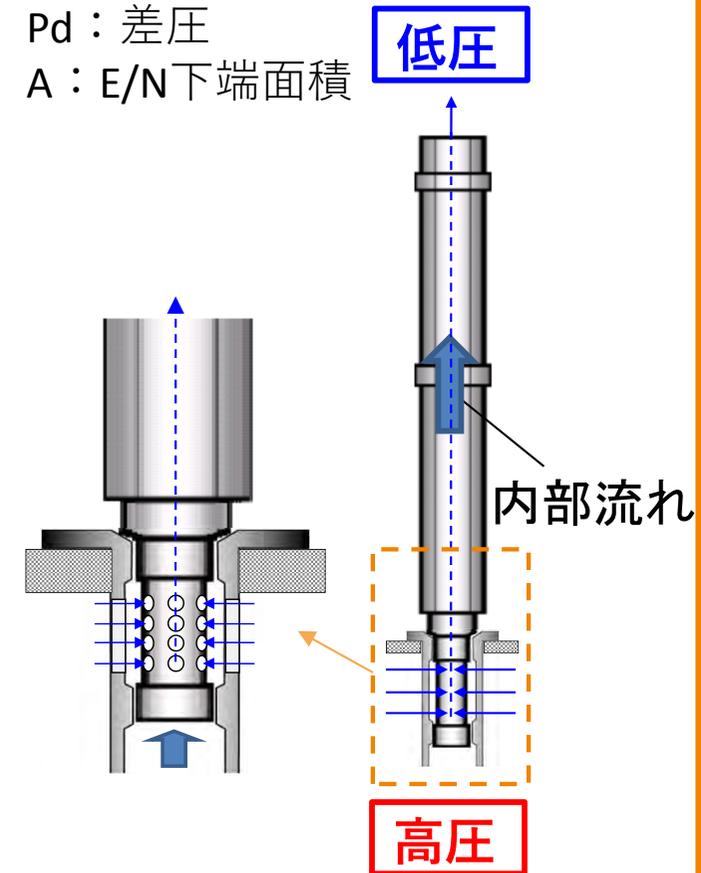
2) もんじゅでは炉心構成要素の20%

## ⑩ 内部流水による流体力

$$F = Pd \cdot A$$

$Pd$  : 差圧

$A$  : E/N下端面積



内部流れによる上下差圧で上向き流体力が生じる<sup>3)</sup>。

3) もんじゅでは重力の40%

## 5. 外力ベクトル

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F]$$

	① 上部パッドの衝突	② 中間パッドの衝突	③ エントランスノズル上部の衝突	④ エントランスノズル下部の衝突	⑤ 球面座の衝突	⑥ 球面座の摩擦	⑦ 流路網流体力	⑧ ダッシュポットの差圧荷重	⑨ 排除質量による流体慣性力	⑩ 内部流水による荷重	質量	
n次モードの一般力	n次モードの一般力	n次モードの一般力					n次モードの一般力					3次×2方向 6行
重心における水平荷重	衝突荷重	衝突荷重	衝突荷重 (地震力)	衝突荷重 (地震力)	衝突荷重 (地震力)	摩擦荷重	流体力荷重					2方向
重心における回転モーメント	衝突回転モーメント	衝突回転モーメント	衝突回転モーメント	衝突回転モーメント	衝突回転モーメント	摩擦回転モーメント	流体力回転モーメント					2方向
重心における鉛直荷重	摩擦荷重	摩擦荷重	摩擦荷重	摩擦荷重	衝突荷重 (地震力)	摩擦荷重		差圧による荷重	流体慣性力	内部流水による荷重	炉心構成要素の全質量	1方向

ステップ1：衝突部の  
絶対変位、加速度

$$\text{絶対変位} = \text{モード変位} + \text{重心の変位} \cdot \text{回転変位}$$

$$\text{絶対速度} = \text{モード速度} + \text{重心の速度} \cdot \text{回転速度}$$

ステップ2：衝突荷重

$$\text{衝突荷重} = \text{衝突ばね力} + \text{衝突減衰力}$$

$$\text{衝突ばね力} = \text{衝突ばね剛性} * \text{相対変位}$$

(相対変位の符号により衝突の有無を判断)

$$\text{衝突減衰力} = \text{衝突減衰定数} * \text{相対速度}$$

(相対速度の符号により減衰力の方向を判断)

$$\text{衝突摩擦力} = \text{摩擦係数} * \text{衝突荷重}$$

ステップ3：外力

$$\begin{aligned} \text{n次モードの一般力} \\ = \text{固有モード} \\ * \text{衝突荷重} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{回転モーメント} \\ = \text{重心からの距離} \\ * \text{衝突荷重} \end{aligned}$$

隣接パッド間の絶対変位、絶対速度  
から相対変位、相対速度を算出

衝突荷重を  
n次モードの一般力に変換

## 5. 流路網理論による流体荷重の計算方法

ステップ1：各断面の  
絶対変位、加速度

絶対変位 = モード変位  
+ 重心の変位・  
回転変位

絶対加速度 =  
モード加速度  
+ 重心の加速度・  
回転加速度

ステップ2：流体荷重

角部圧力を**加速度**から算出  
この時、最外層の境界条件は  
炉心全体を円筒と見做し設定

$$3p_1 - p_6 - p_2 - p_8 = -\frac{\rho \cdot l_w^2}{2 \cdot \delta} (\ddot{\delta}_1 + \ddot{\delta}_2 + \ddot{\delta}_8)$$

角部の圧力と隙間の相対加速度  
各辺の**流体荷重**を算出

$$f_1 = \int_{\textcircled{6}}^{\textcircled{1}} p \cdot d\xi = \frac{l_w}{2} (p_6 + p_1) - \frac{\rho_L \cdot l_w^3}{12 \cdot \delta} \ddot{\delta}_1$$

ステップ3：外力

n次モードの一般力  
= 固有モード  
\* **流体荷重**

回転モーメント  
= 重心からの距離  
\* **流体荷重**

各断面の**絶対加速度**から流路網  
理論を用いて各辺に作用する  
**流体荷重**を算出

**流体荷重**を  
n次モードの一般力に変換