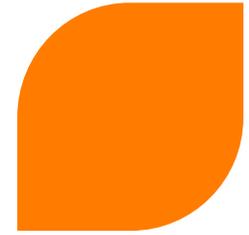




# L'incident de Fukushima Daiichi

1. Conception de l'installation
2. Progression de l'accident
3. Rejets radioactifs
4. Piscines de désactivation
5. Sources d'information

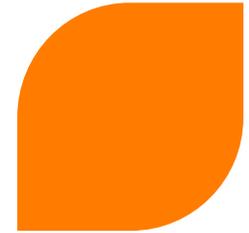
Matthias Braun  
PEPA4-G, AREVA–NP GmbH  
Matthias.Braun@AREVA.com



Traduction française réalisée par O. Rouyre-Cros, TRI/SSQ

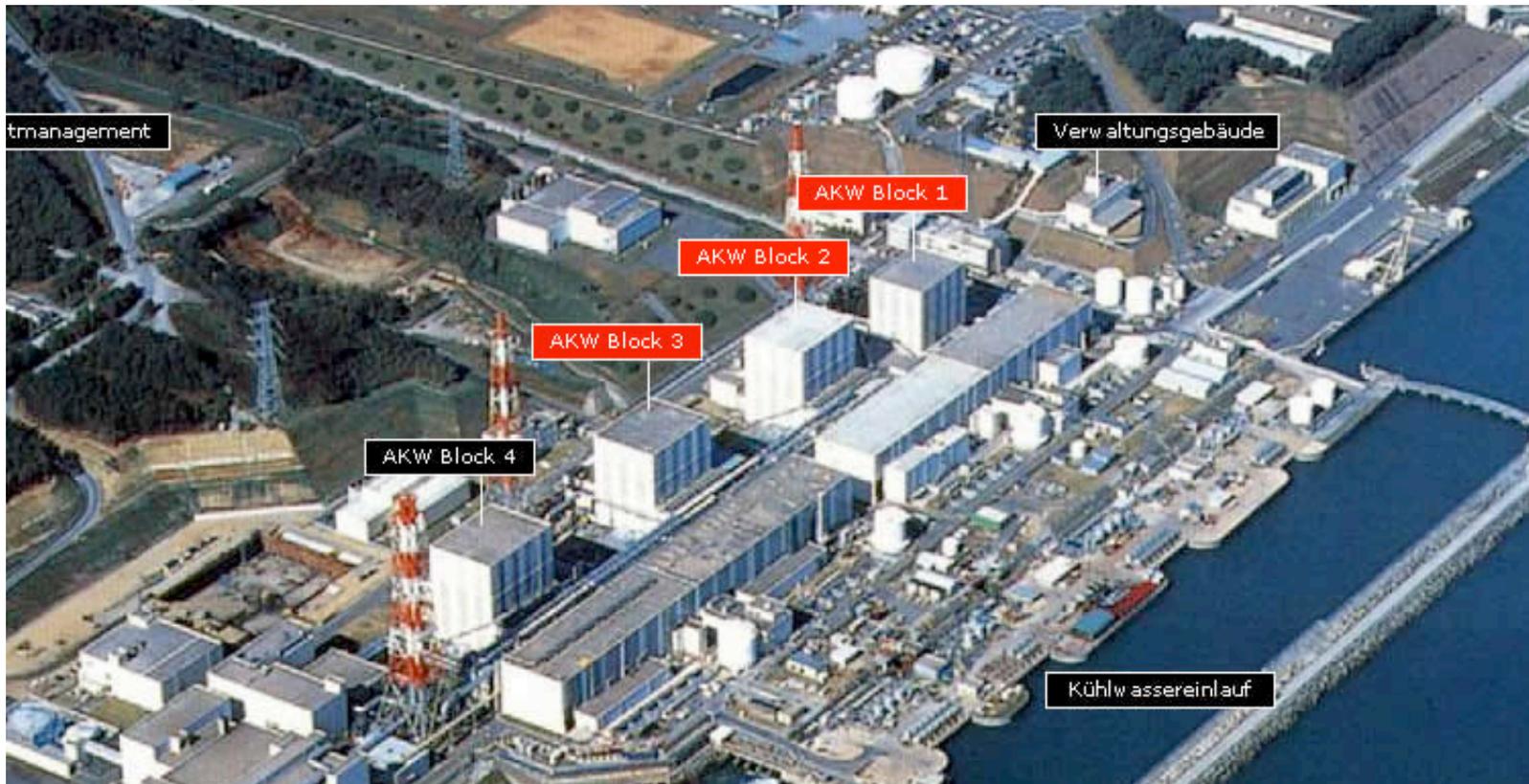
# L'incident de Fukushima Daiichi

## 1. Conception de l'installation



### ► Fukushima Daiichi (Centrale I)

- ◆ Tranche I - GE Mark I BWR (439 MW), En service depuis 1971
- ◆ Tranches II-IV - GE Mark I BWR (760 MW), En service depuis 1974

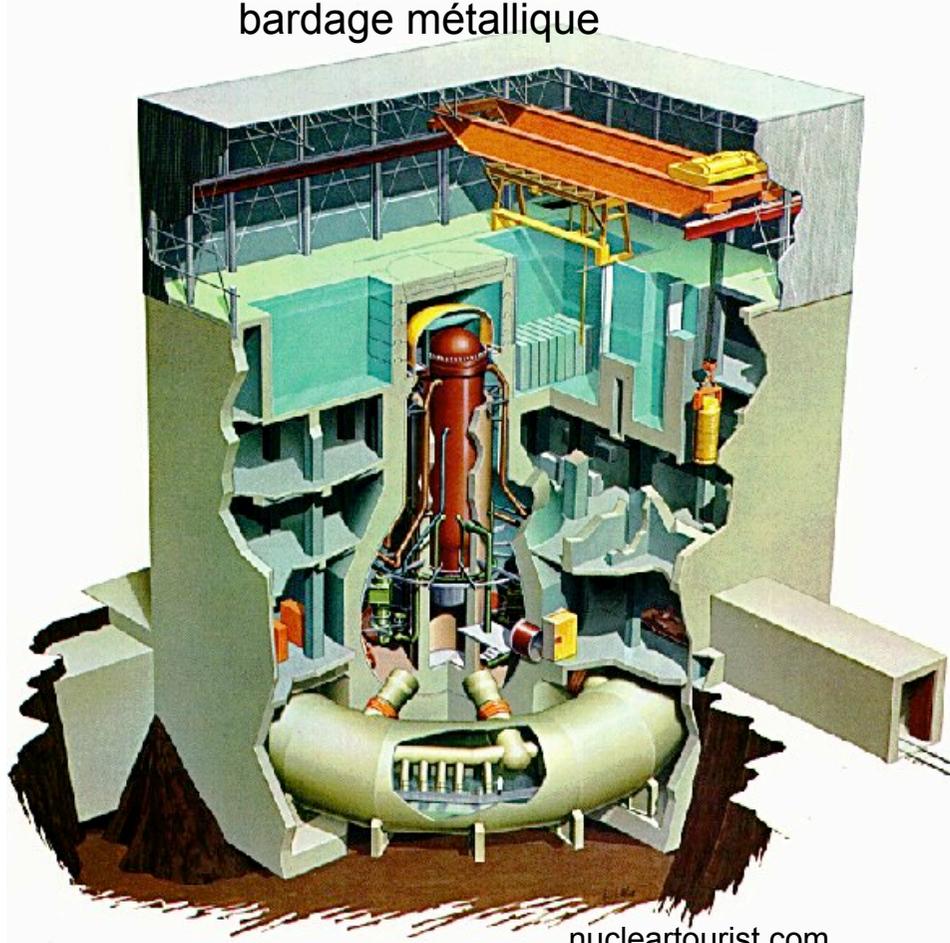


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 1. Conception de l'installation

### ► Structure du bâtiment

- ◆ Bâtiment en béton
- ◆ Plancher de service en bardage métallique



### ► Enceinte de confinement

- ◆ Puits sec en forme de poire
- ◆ Puits humide en forme de tore



en.wikipedia.org/wiki/Browns\_Ferry\_Nuclear\_Power\_Plant

# L'incident de Fukushima Daiichi

## 1. Conception de l'installation



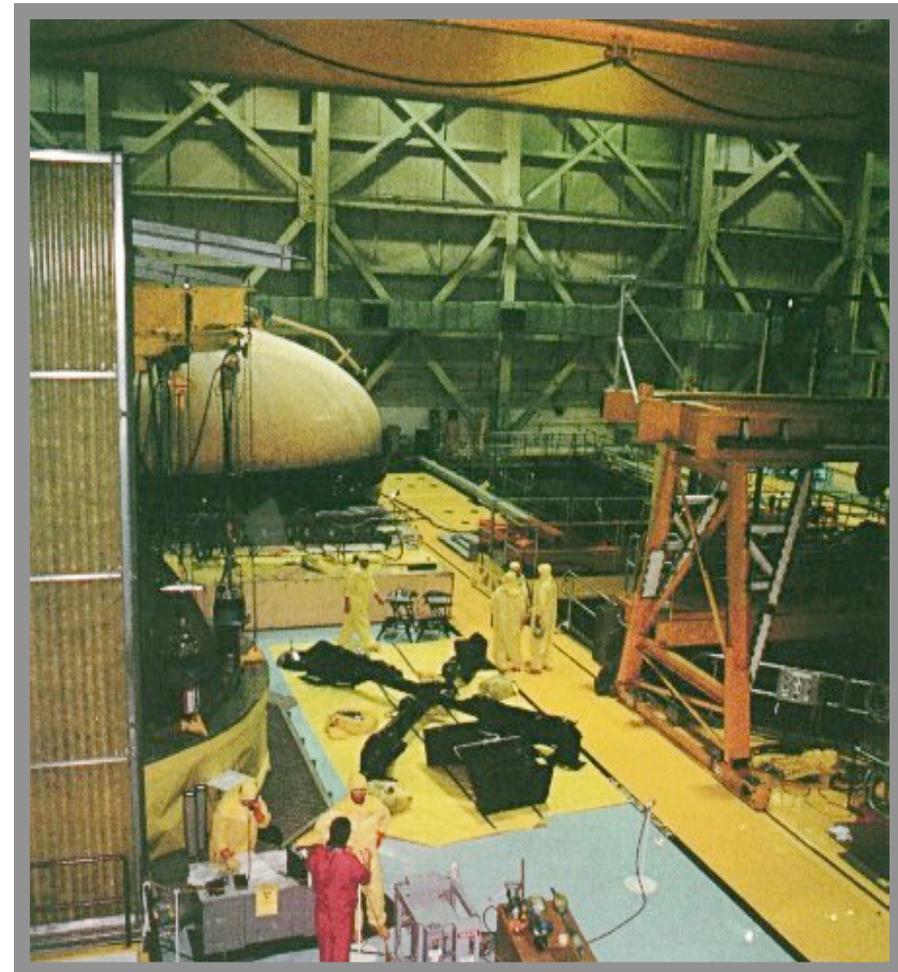
### ► Plancher de service



# L'incident de Fukushima Daiichi

## 1. Conception de l'installation

- ▶ Manutention de la coupole de fermeture de l'enceinte de confinement



# L'incident de Fukushima Daiichi

## 1. Conception de l'installation



▶ Plancher de service du réacteur  
(construction en acier)

▶ Bâtiment réacteur en béton  
(confinement secondaire)

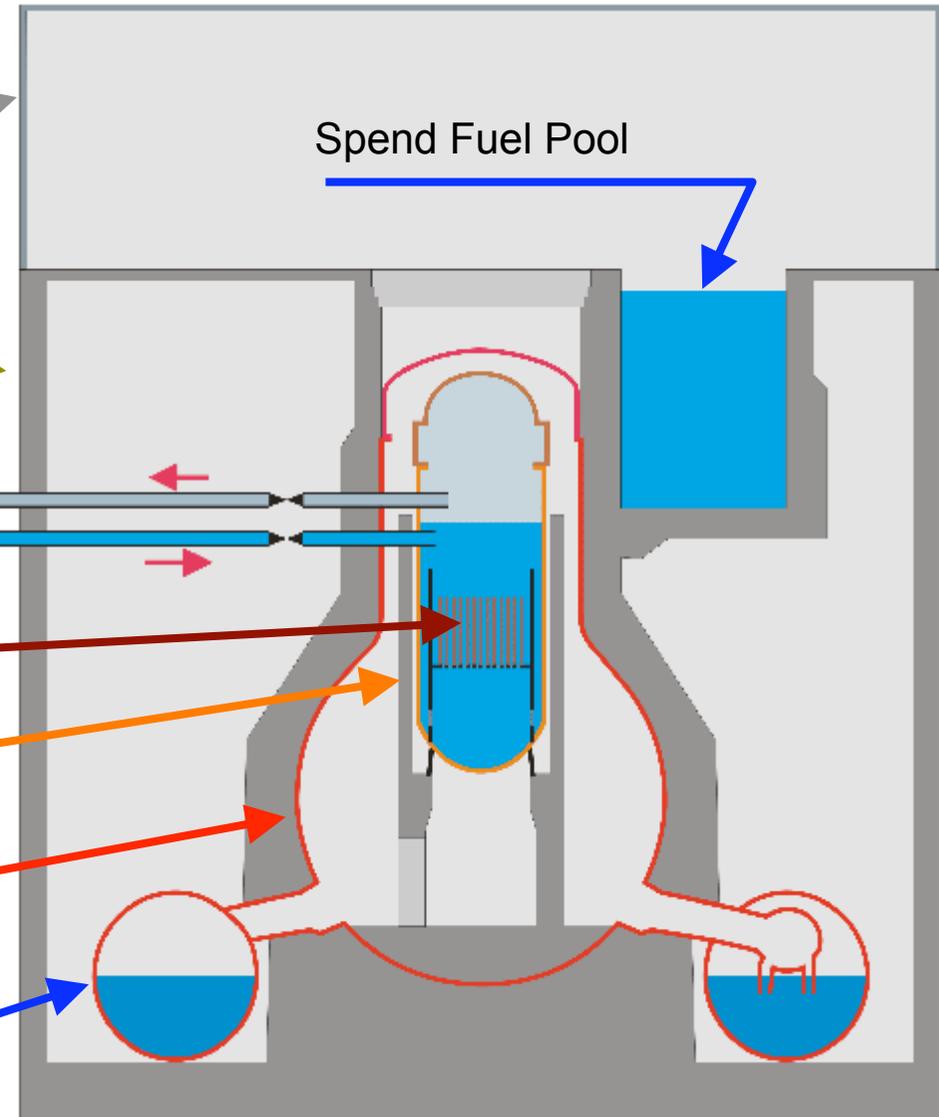
Ligne vapeur vive  
Eau alimentaire

▶ Coeur du réacteur

▶ Cuve du réacteur

▶ Enceinte (Puits sec)

▶ Enceinte (Puits humide) /  
Chambre de Condensation

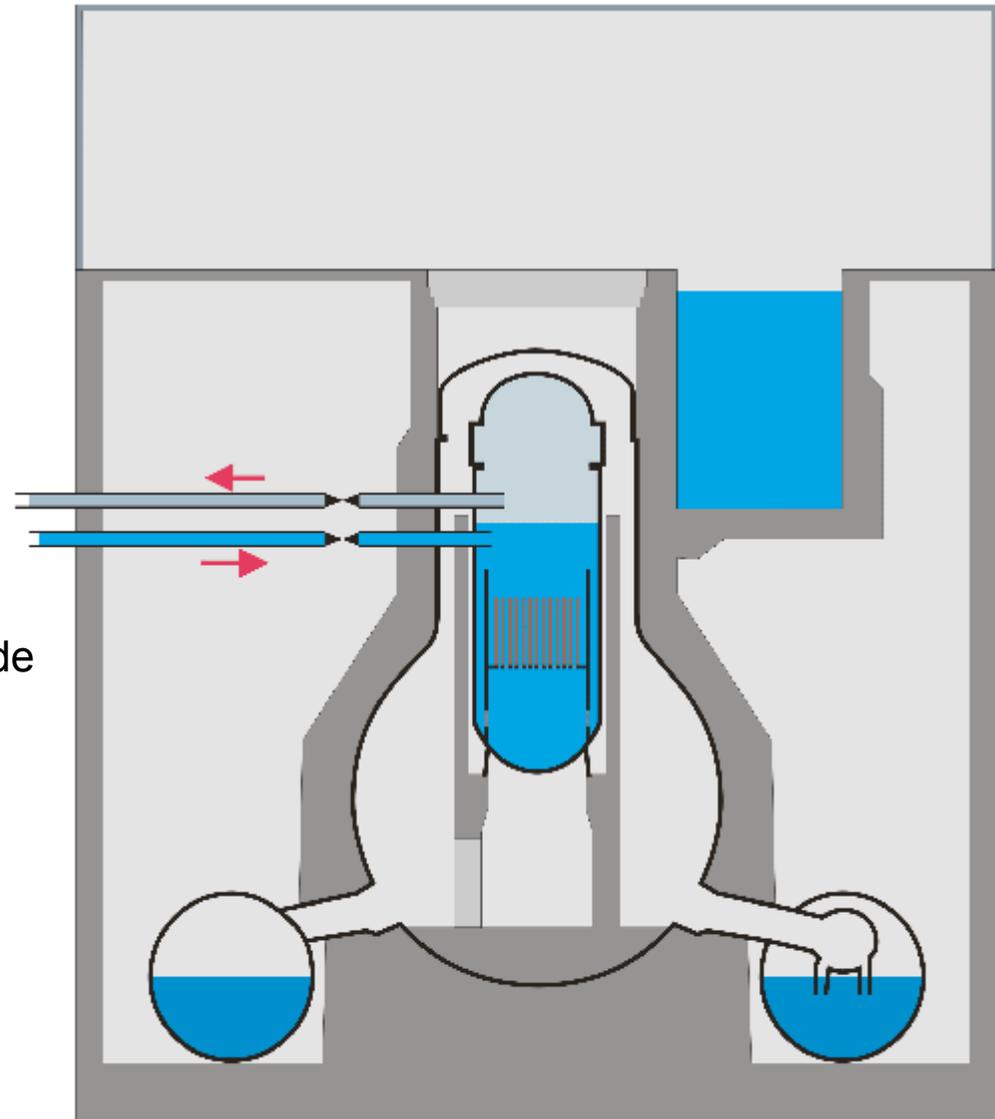


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ 11.3.2011 14:46 - Séisme
  - ◆ Magnitude 9
  - ◆ Ecrroulement du réseau de transport d'électricité du nord Japon
  - ◆ Les réacteurs eux-mêmes sont globalement non endommagés
  
- ▶ Arrêt Automatique Réacteur
  - ◆ La puissance issue de la fission de l'uranium cesse
  - ◆ Production de chaleur due à la décroissance radioactive des produits de fission
    - After Scram ~6%
    - After 1 Day ~1%
    - After 5 Days ~0.5%

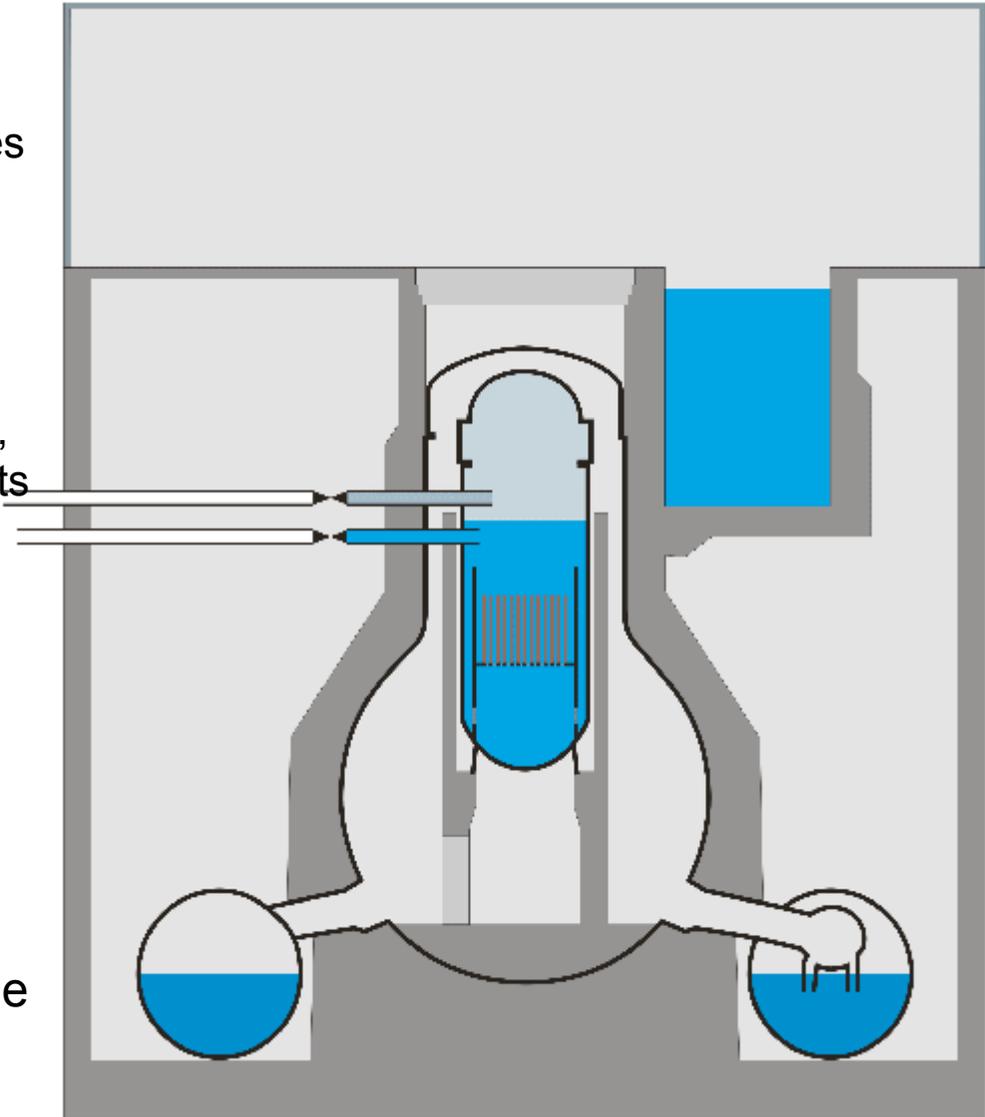


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ Isolement du confinement
  - ◆ Fermeture de toutes les traversées enceinte non importantes pour la sûreté
  - ◆ Séparation de la salle des machines
  - ◆ Si l'isolement enceinte fonctionne, un rejet massif précoce de produits de fissions est hautement improbable
  
- ▶ Démarrage des groupes diesels
  - ◆ Les systèmes d'injection de sécurité sont alimentés
  
- ▶ L'installation est dans un état stable et sûr

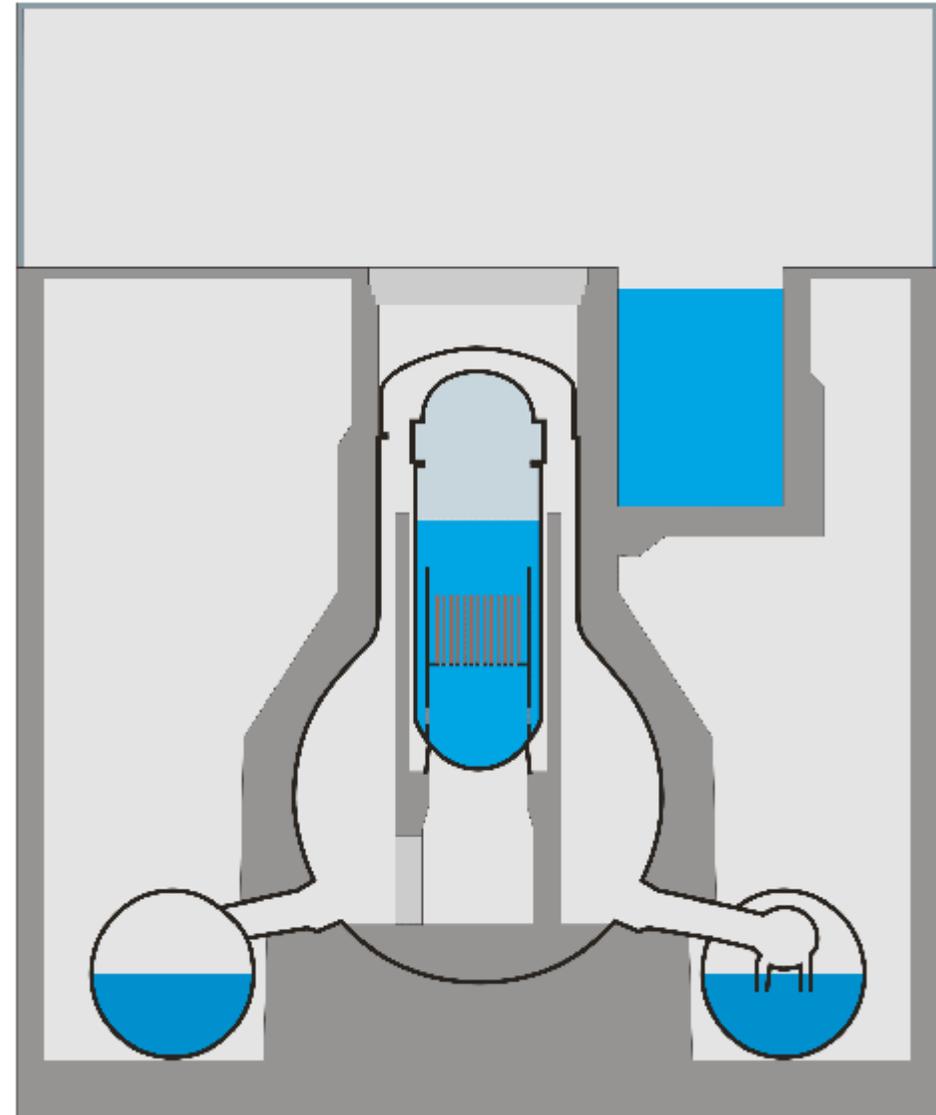


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ 11.3. 15:41 Le tsunami frappe la centrale
  - ◆ Conception de la centrale pour une hauteur de tsunami de 6,5m
  - ◆ Hauteur réelle du Tsunami >7m
  - ◆ Inondation des
    - Groupes électrogènes diesel et/ou
    - Bâtiment essentiel d'eau de service pour le refroidissement des diesels
  
- ▶ Perte totale des alimentations électriques
  - ◆ Défaut de mode commun sur les sources électriques
  - ◆ Ne restent que les batteries
  - ◆ Défaillance de tous les systèmes de d'injection de sécurité sauf un

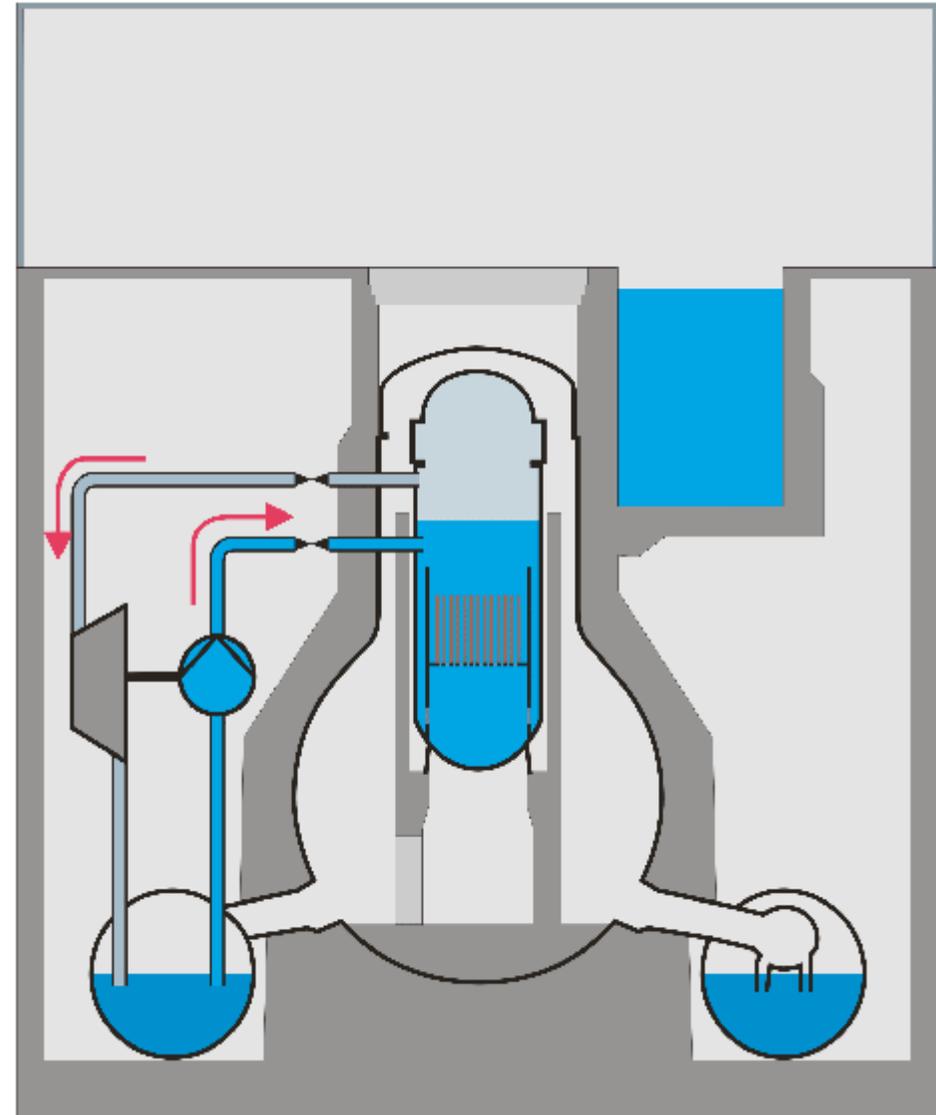


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident

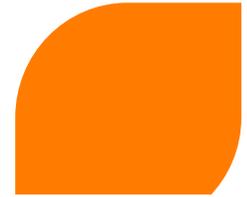


- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé reste disponible
  - ◆ La vapeur issue du réacteur entraîne une turbine
  - ◆ La vapeur est condensée dans le puits humide
  - ◆ La turbine entraîne une pompe
  - ◆ L'eau du puits humide est pompée vers le réacteur
  - ◆ Cela nécessite :
    - La disponibilité des batteries
    - La température dans le puits humide doit rester  $< 100^{\circ}\text{C}$
  
- ▶ Comme il n'y a pas de retrait de chaleur dans le bâtiment, la pompe de refroidissement en mode isolé peut fonctionner indéfiniment.

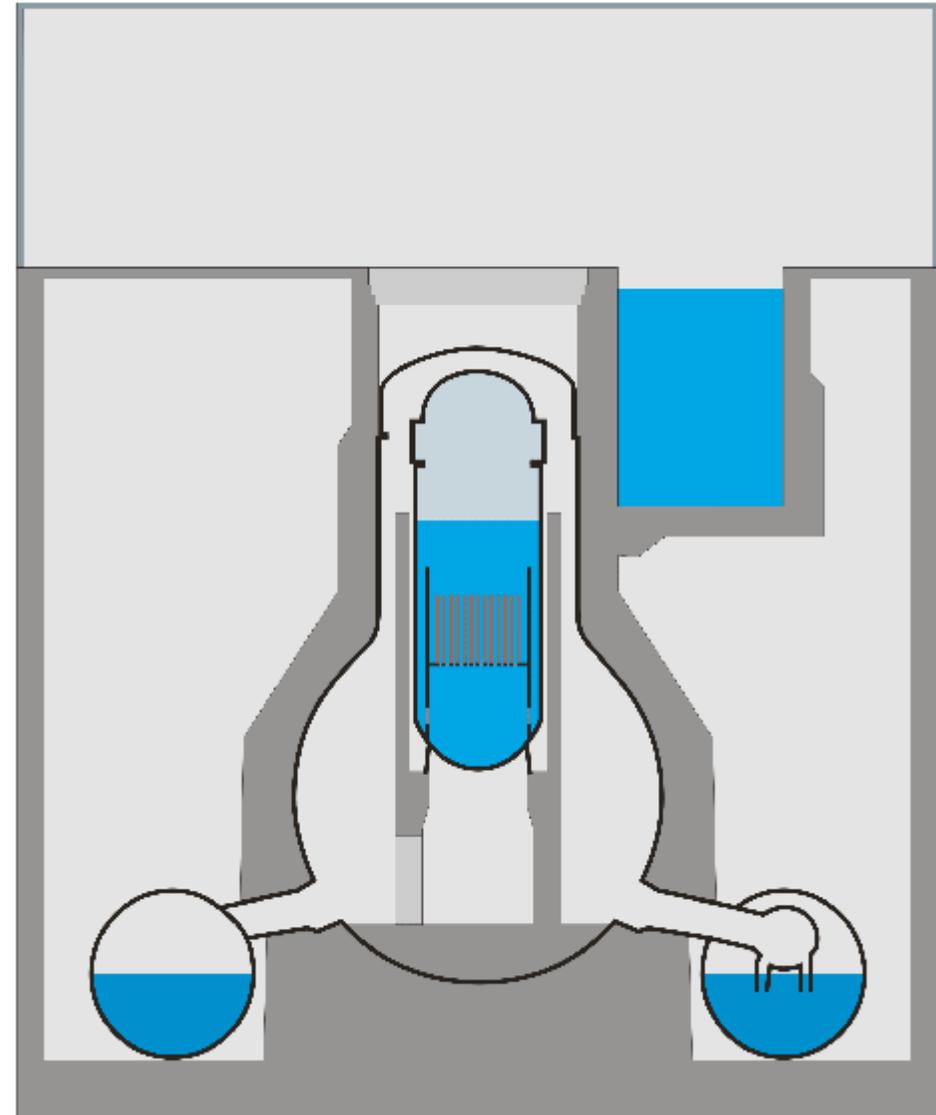


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
  - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
  - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
  - ◆ 13.3. 2:44 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
  - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
  - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve

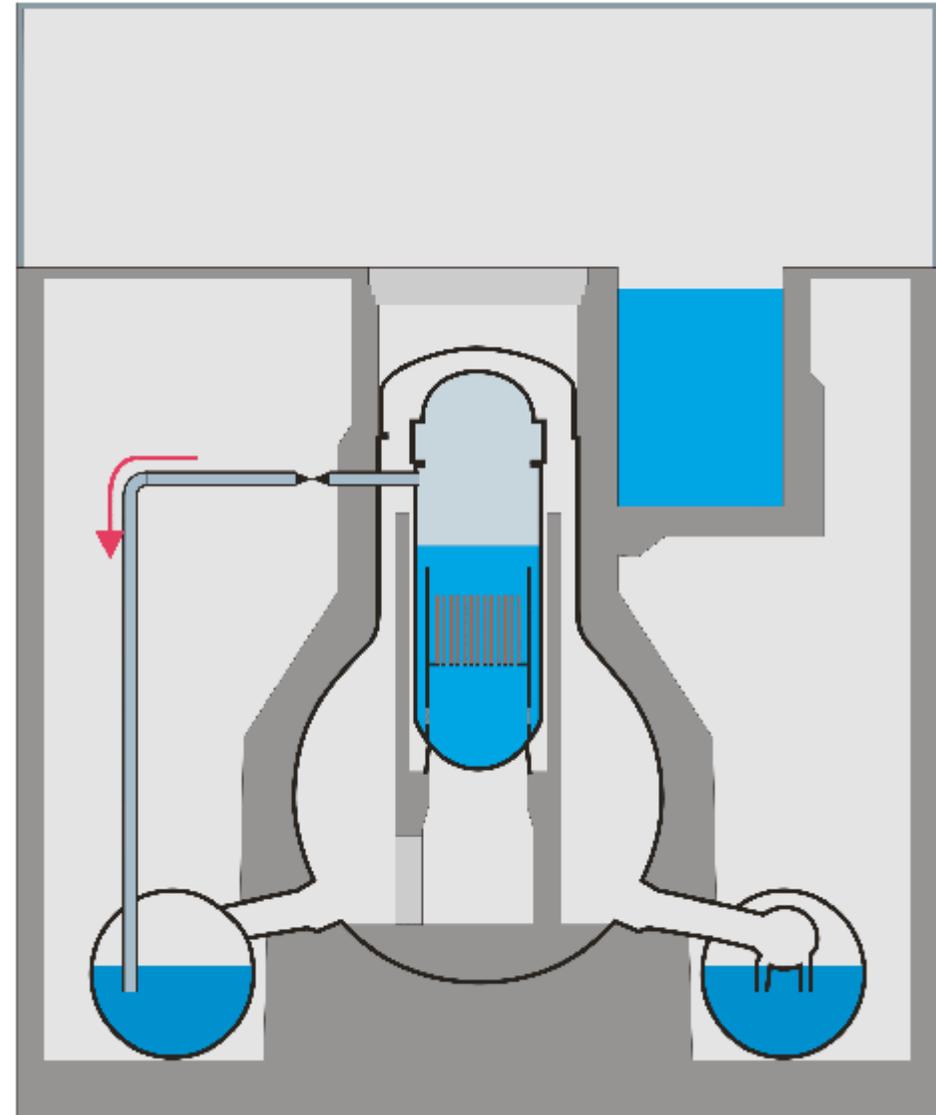


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
  - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
  - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
  - ◆ 13.3. 2:44 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
  - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
  - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve

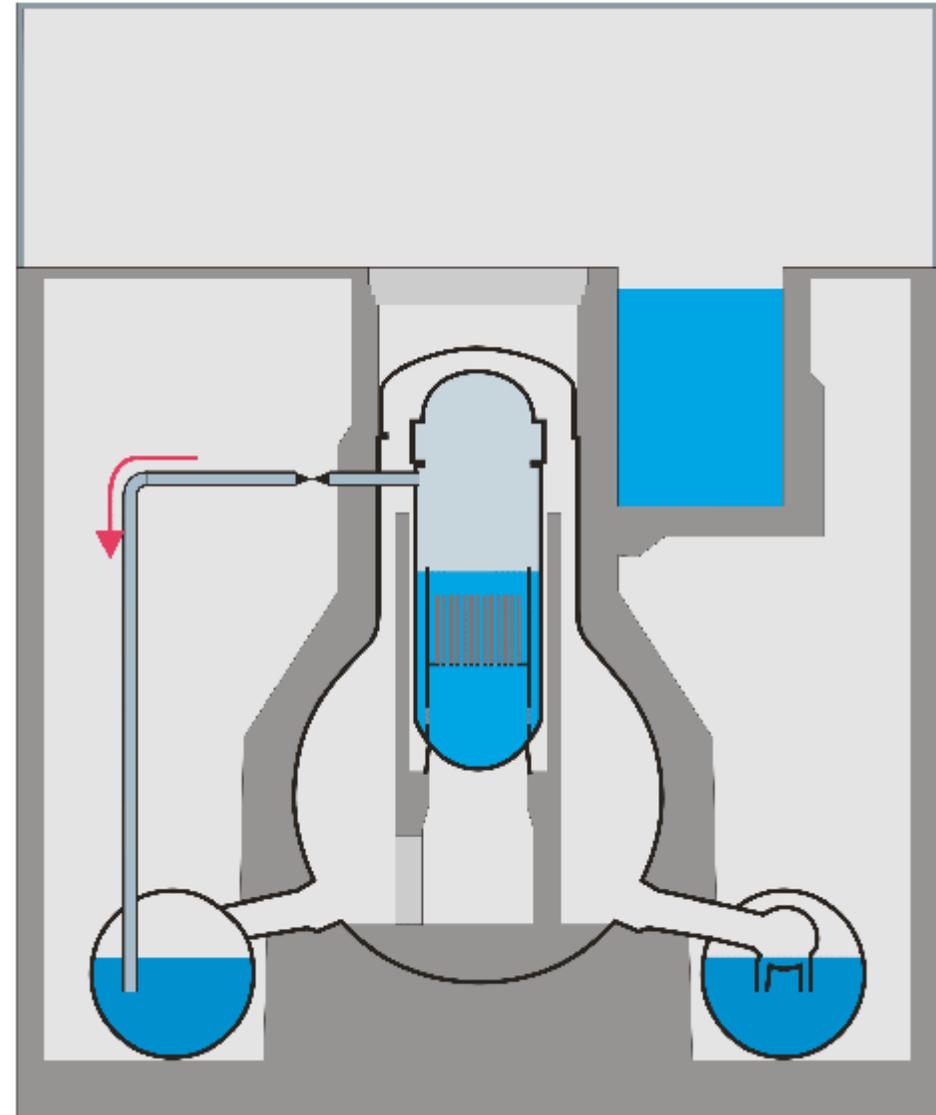


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
  - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
  - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
  - ◆ 13.3. 2:44 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
  - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
  - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve

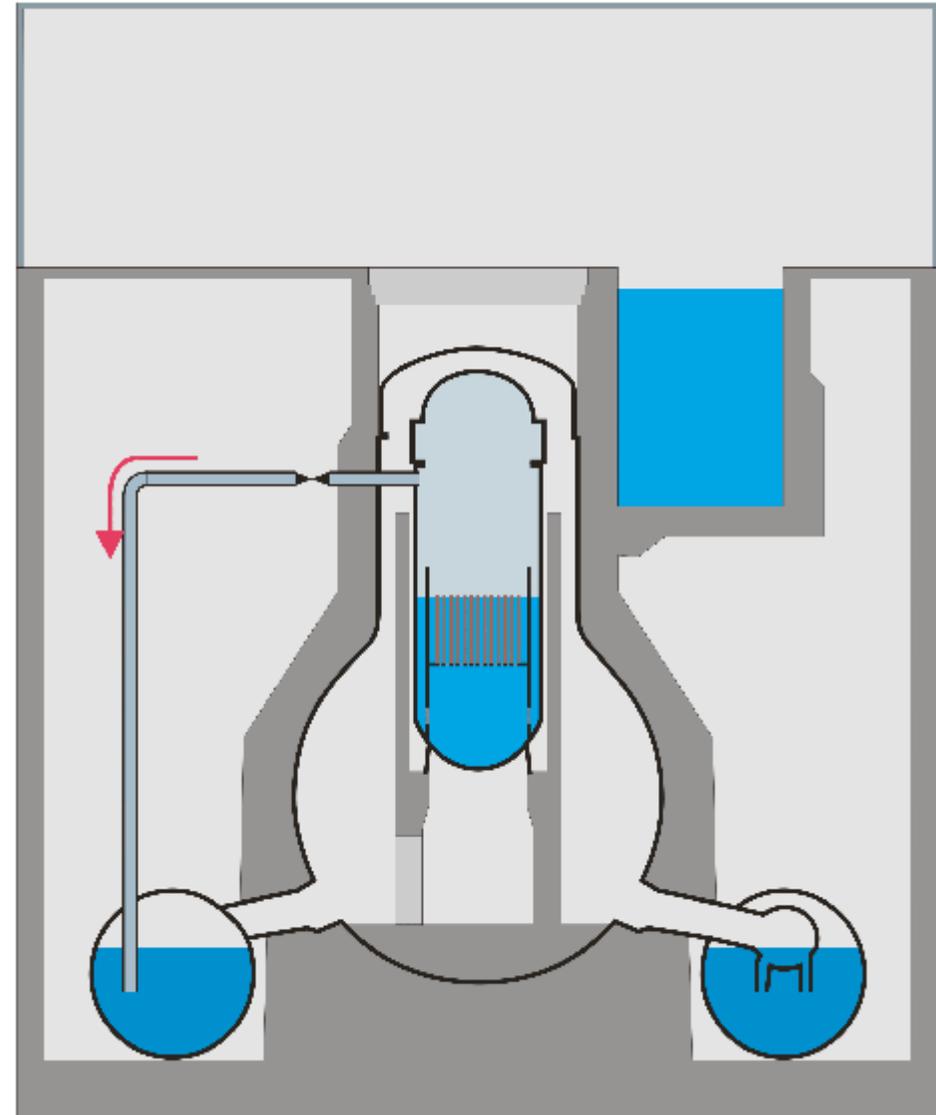


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
  - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
  - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
  - ◆ 13.3. 2:44 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
  - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
  - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve

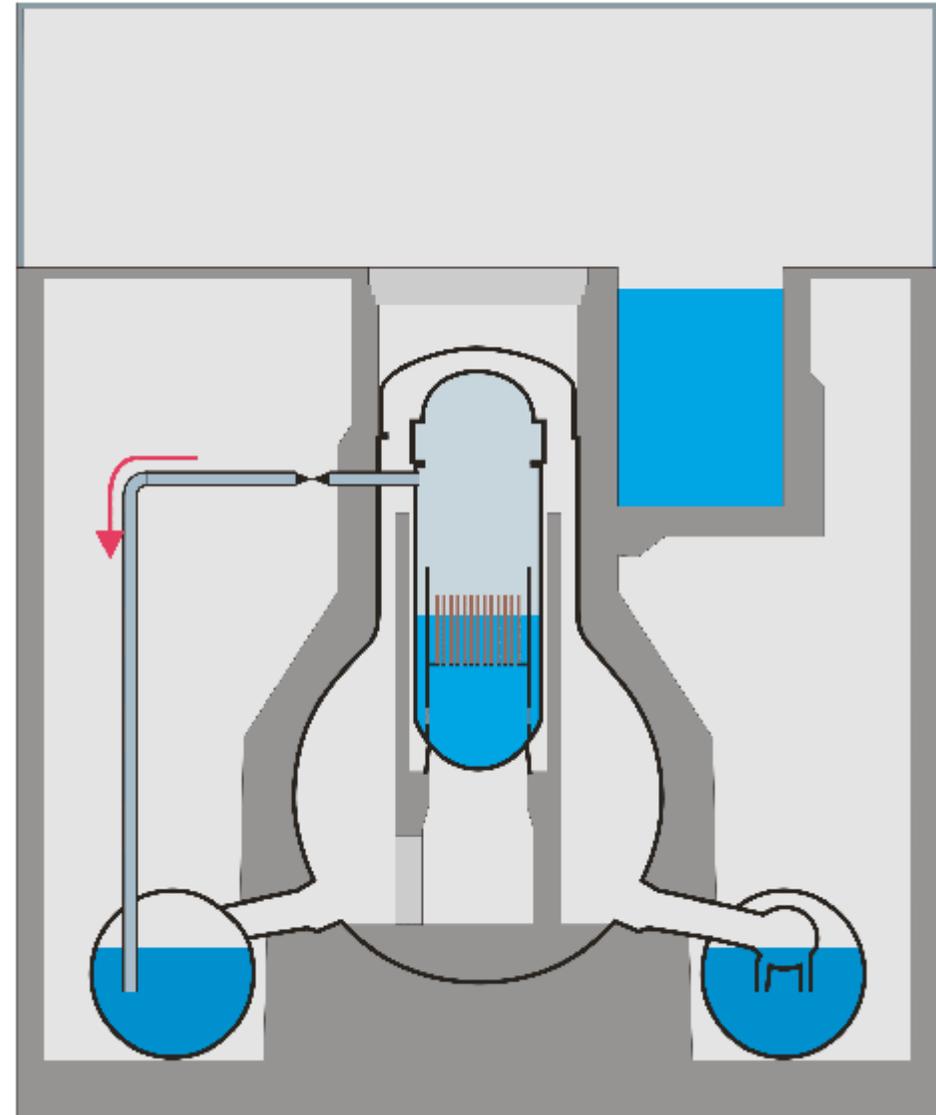


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La pompe de refroidissement en mode isolé s'arrête
  - ◆ 11.3. 16:36 sur tranche 1 (Batteries vides)
  - ◆ 14.3. 13:25 sur tranche 2 (Défaillance de la pompe)
  - ◆ 13.3. 2:44 sur la tranche 3 (Batteries vides)
- ▶ La puissance résiduelle produit toujours de la vapeur dans la cuve
  - ◆ La pression augmente
- ▶ Ouverture des vannes de dépressurisation
  - ◆ Décharge vers le puits humide
- ▶ Baisse du niveau liquide dans la cuve

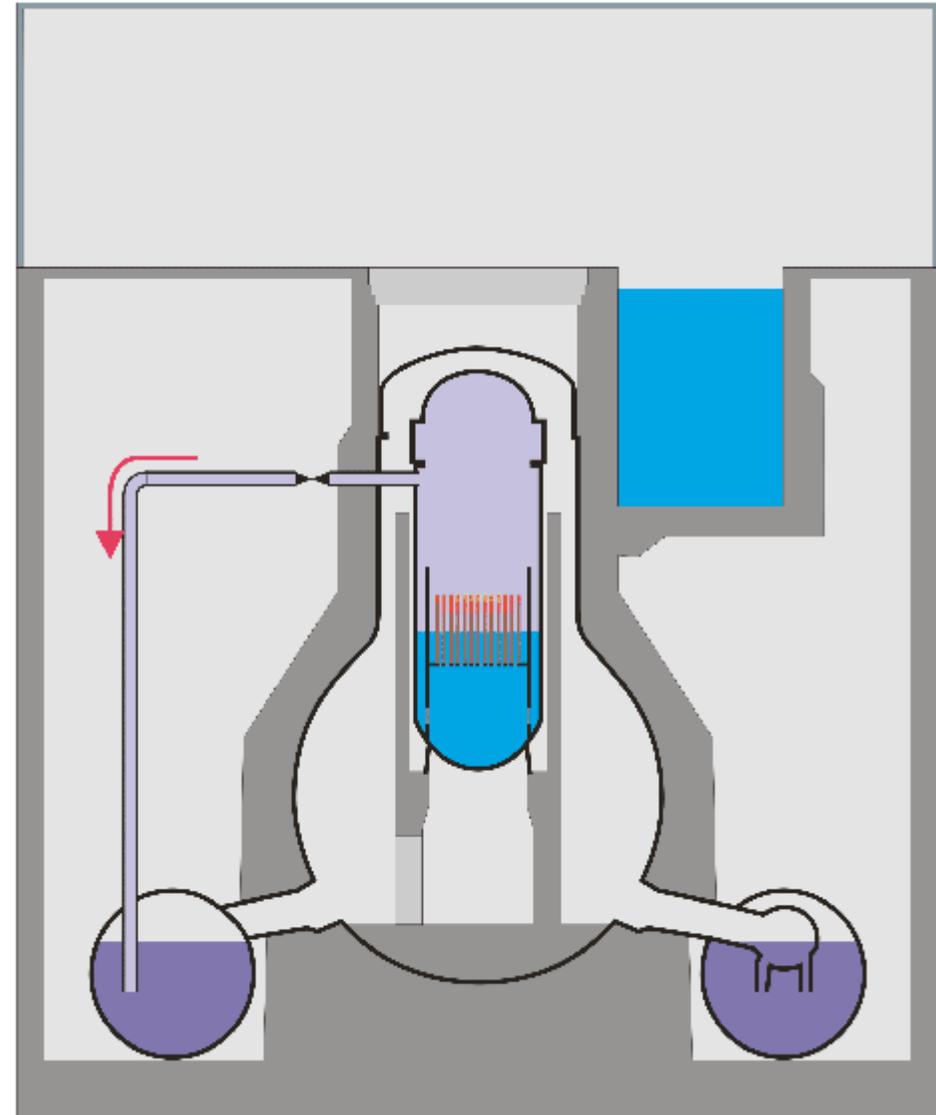


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ La mesure du niveau liquide indiquée ici est le niveau tassé. Le véritable niveau est supérieur du fait des bulles de vapeur présentes dans le liquide (émulsion)
- ▶ ~50% du coeur découvert
  - ◆ La température des gaines augmente, sans dégât significatif au coeur
- ▶ ~2/3 du coeur découvert
  - ◆ La température des gaines dépasse ~900°C
  - ◆ Gonflement / rupture des gaines
  - ◆ Relâchement de produits de fission par les ruptures de gaines

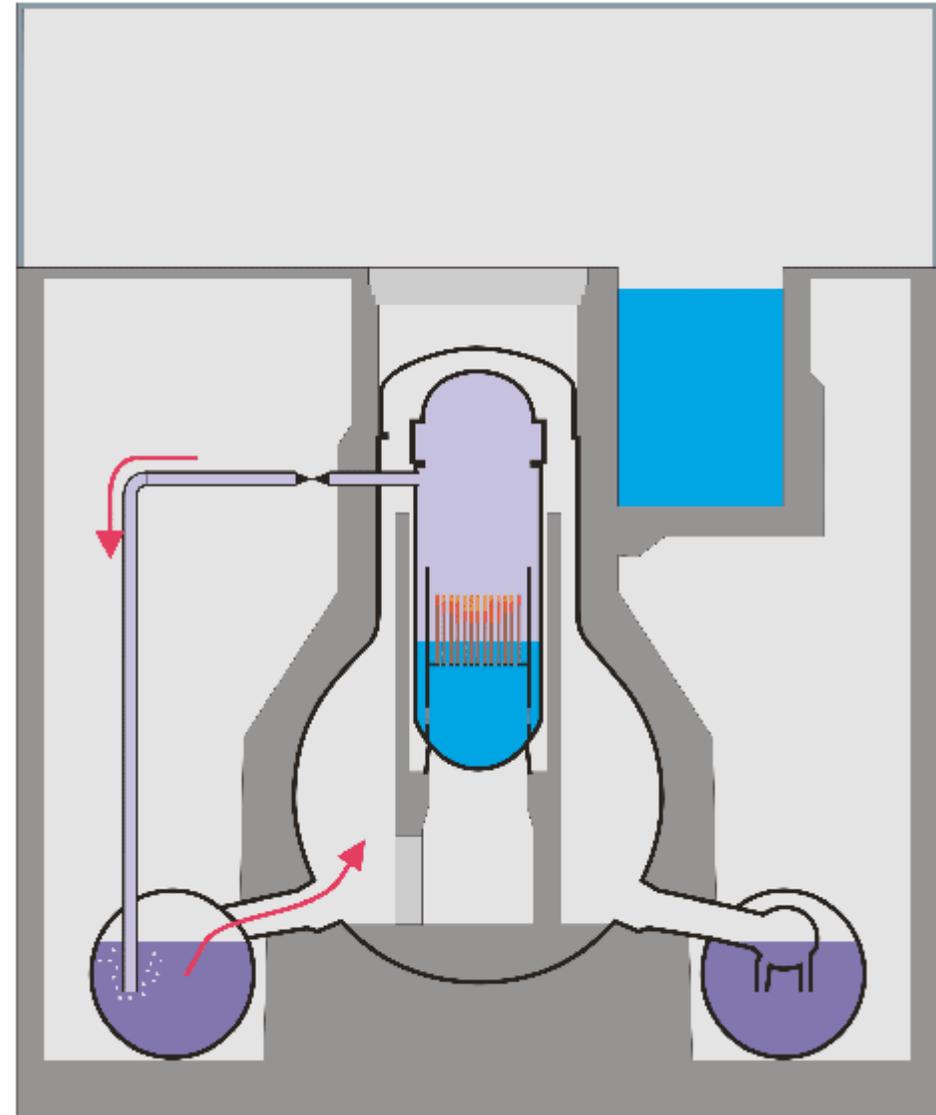


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



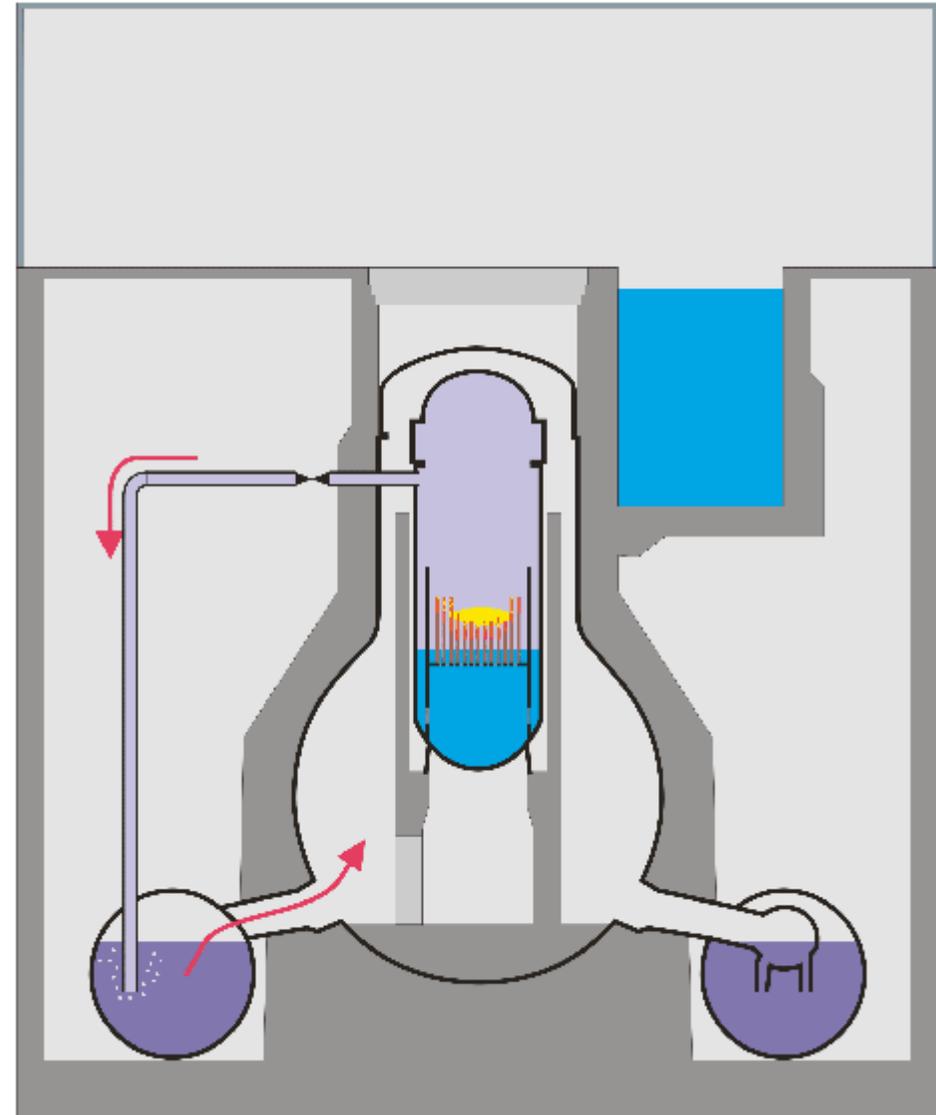
- ▶ ~3/4 du coeur découvert
  - ◆ Les gaines dépassent ~1200°C
  - ◆ Le zirconium des gaines commence à brûler en atmosphère vapeur
  - ◆  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$
  - ◆ La réaction exothermique chauffe encore plus le coeur
  - ◆ Production d'hydrogène
    - Tranche 1: 300-600kg
    - Tranches 2/3: 300-1000kg
  - ◆ L'hydrogène est poussé dans le puits humide, le puits humide se décharge dans le puits sec (soupape)



# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident

- ▶ A ~1800°C [Tranches 1,2,3]
  - ◆ Fusion des gaines
  - ◆ Fusion de la structure des éléments
  
- ▶ A ~2500°C [Tranches 1,2]
  - ◆ Rupture des crayons combustibles
  - ◆ Couche de débris dans le coeur
  
- ▶ A ~2700°C [Tranche 1]
  - ◆ Fusion d'eutectiques Uranium-Zirconium
  
- ▶ La restauration de l'injection d'eau arrête l'accident sur les 3 tranches
  - ◆ TR 1: 12.3. 20:20 (27h sans eau)
  - ◆ TR 2: 14.3. 20:33 (7h sans eau)
  - ◆ TR 3: 13.3. 9:38 (7h sans eau)

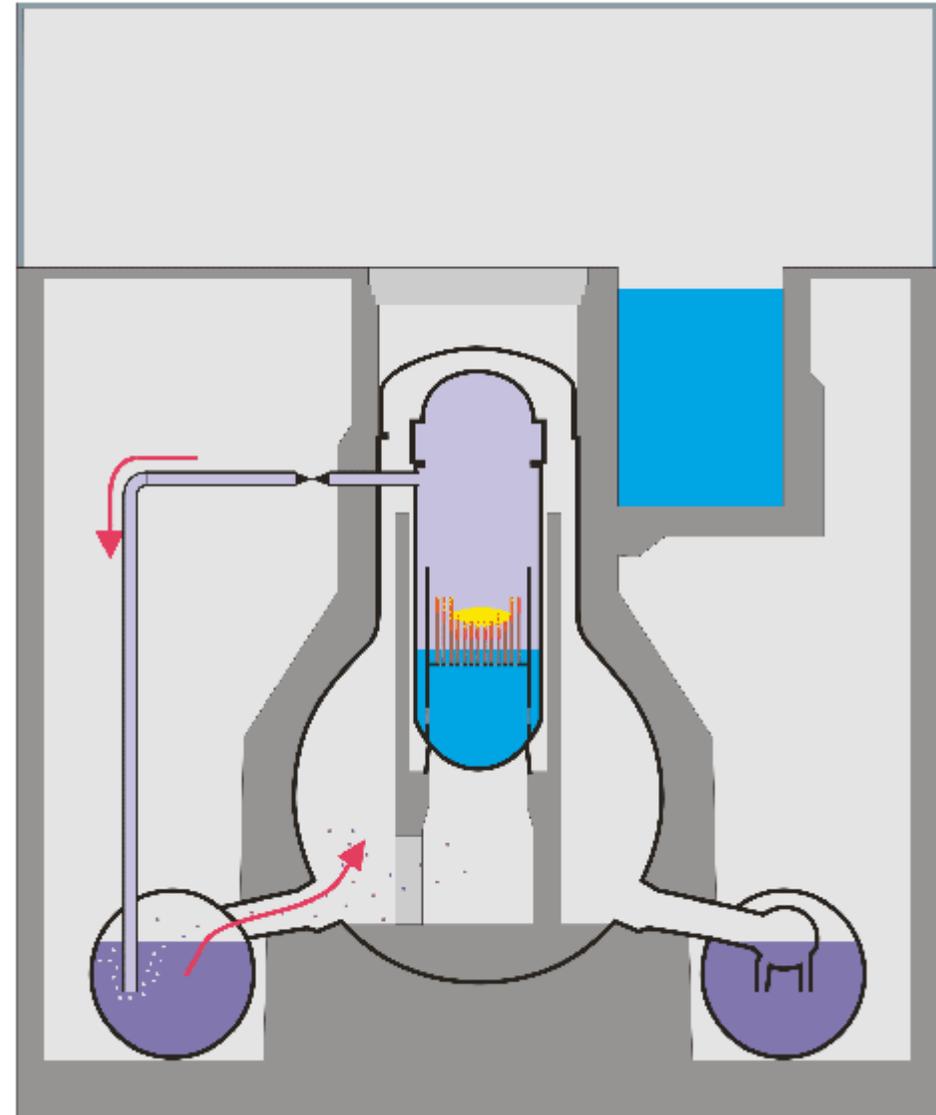


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ Relâchement de produits de fission durant la fusion
  - ◆ Xénon, Césium, Iode,...
  - ◆ Uranium/Plutonium reste en coeur
  - ◆ Des produits de fission se condensent sous forme d'aérosols entraînés par l'air
  
- ▶ Décharge au travers de vannes dans l'eau de la chambre de condensation
  - ◆ La piscine piège une partie des aérosols dans l'eau
  
- ▶ Le xénon et le reste des aérosols pénètrent dans le puits sec
  - ◆ Le dépôt d'aérosols sur les surfaces favorise la décontamination de l'air

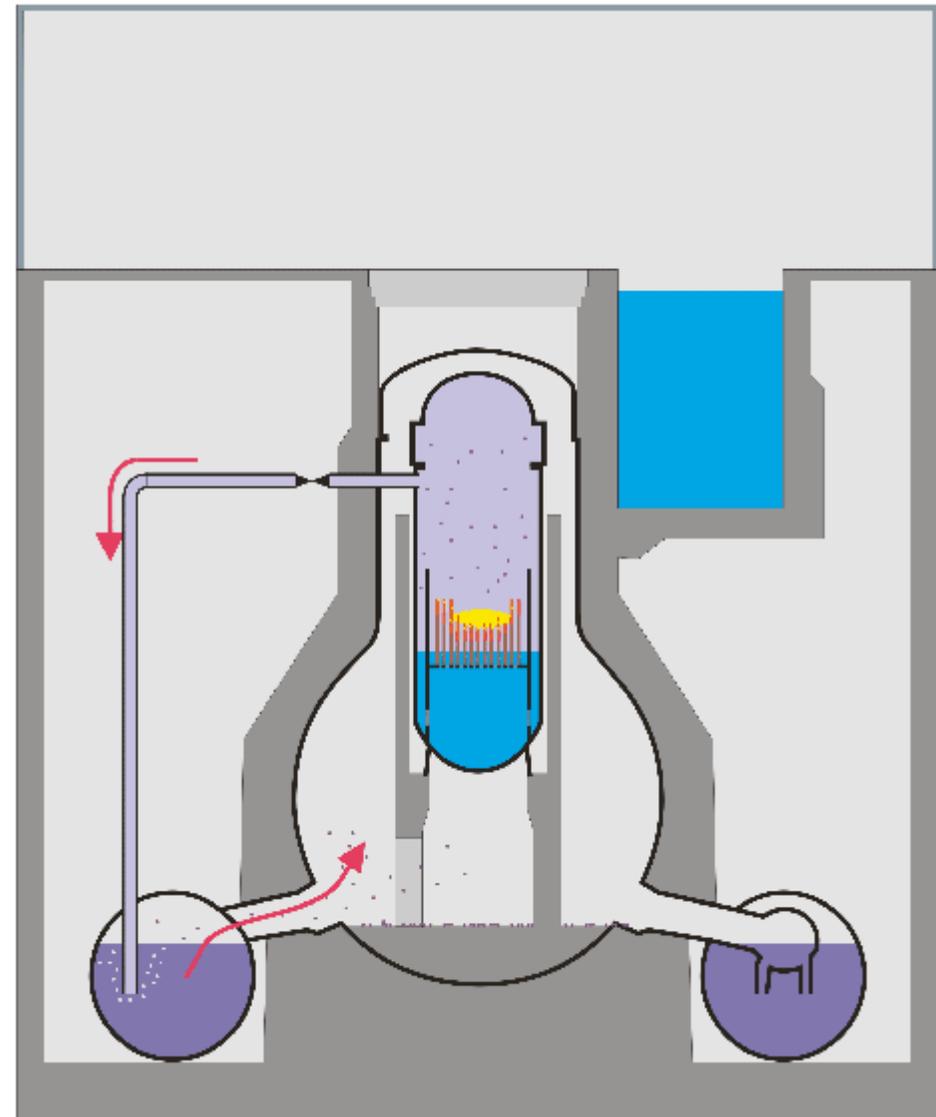


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ Enceinte de confinement
  - ◆ Dernière barrière entre les produits de fission et l'environnement
  - ◆ Epaisseur des murs ~3cm
  - ◆ Pression de calcul 4-5bar
  
- ▶ Pression réelle jusqu'à 8 bars
  - ◆ Gaz d'inertage normal (azote)
  - ◆ Hydrogène issu de l'oxydation du cœur
  - ◆ Chambre de condensation en ébullition (comme une cocotte)
  
- ▶ Dépressurisation de l'enceinte
  - ◆ Tranche 1 : 12.3. 4:00
  - ◆ Tranche 2 : 13.3 00:00
  - ◆ Tranche 3 : 13.3. 8.41

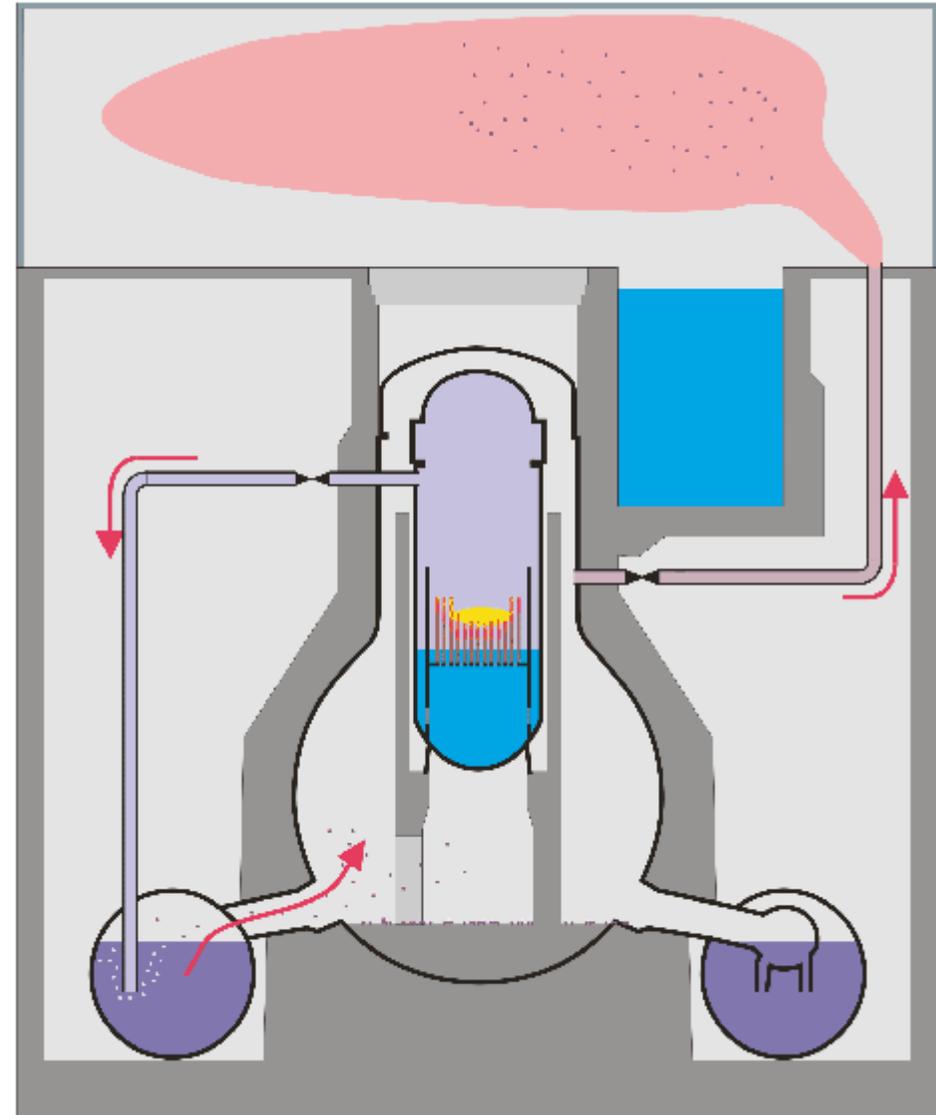


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ Avantages et inconvénients de la dépressurisation de l'enceinte
  - ◆ Retire de l'énergie du bâtiment réacteur (seule solution restante)
  - ◆ Réduction de la pression à ~4 bar
  - ◆ Rejet de petites quantités d'aérosols (iode, césium ~0.1%)
  - ◆ Rejet de gaz rares
  - ◆ Rejet d'hydrogène
  
- ▶ Le mélange gazeux est rejeté vers le plancher de service du réacteur
  - ◆ L'hydrogène est inflammable

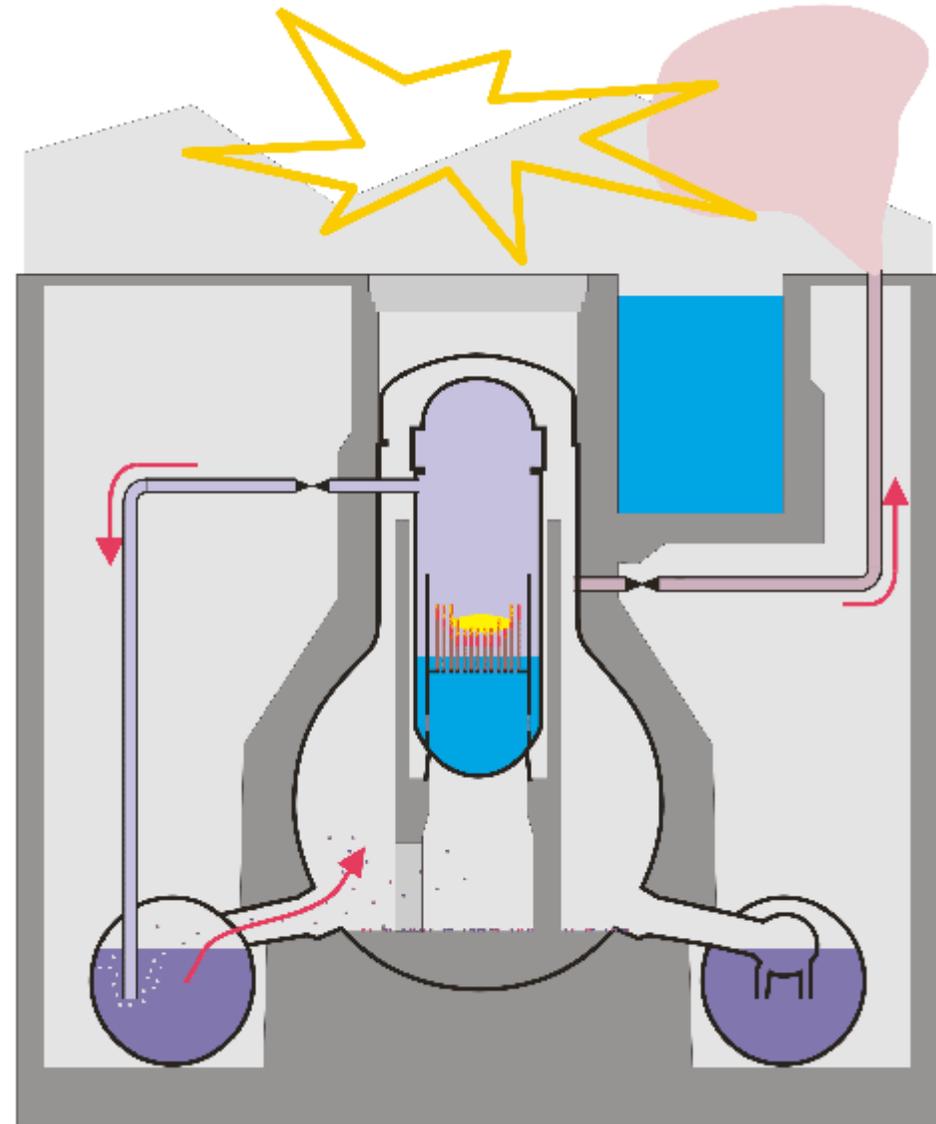


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident

### ▶ Tranches 1 et 3

- ◆ L'hydrogène brûle au niveau du plancher de service du réacteur
- ◆ Destruction du bardage
- ◆ La bâtiment en béton renforcé semble intact
- ◆ Spectaculaire mais impact sûreté faible

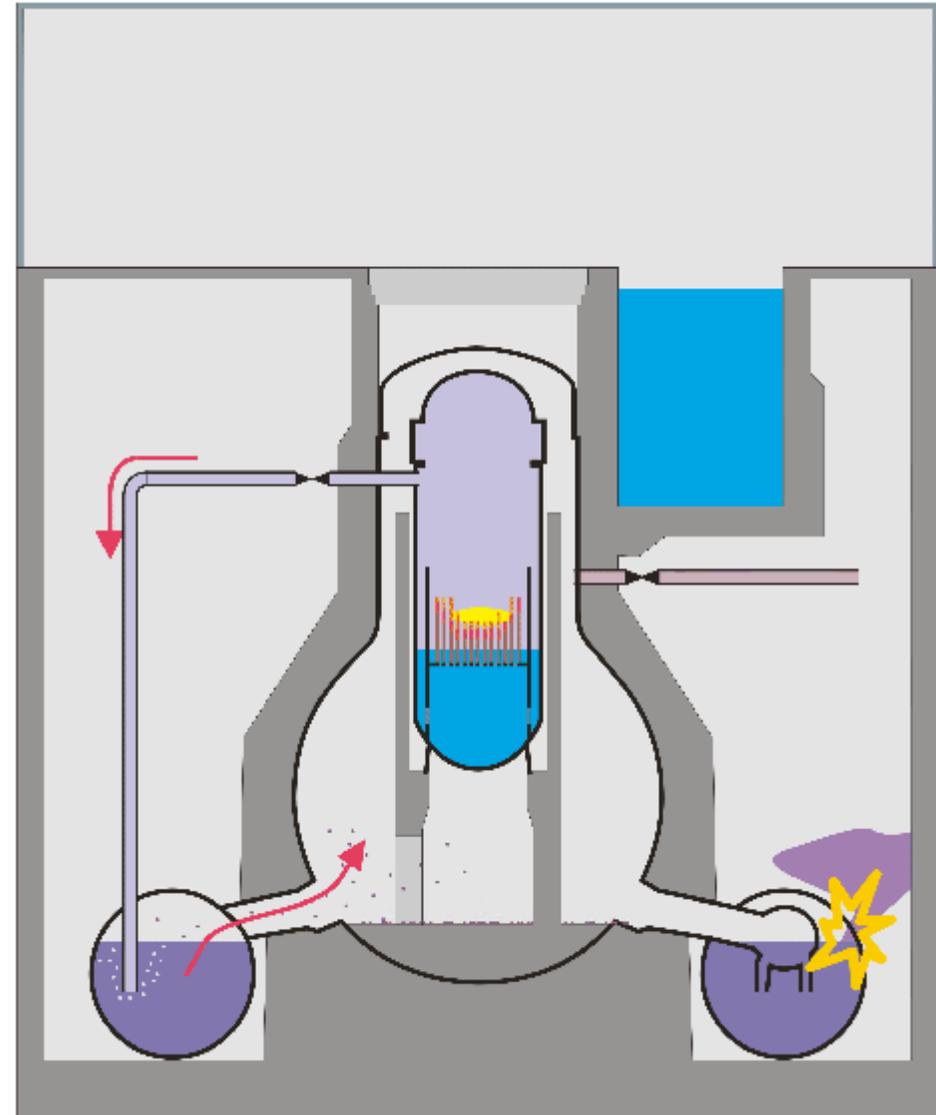


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident



- ▶ Tranche 2
  - ◆ L'hydrogène brûle dans le bâtiment réacteur
  - ◆ Endommagement probable de la chambre de condensation (eau fortement contaminée)
  - ◆ Rejet de gaz incontrôlé de l'enceinte
  - ◆ **Rejet de produits de fission**
  - ◆ Evacuation temporaire du site
  - ◆ Les débits de dose locaux très élevés sur site du fait de la rupture gênent les travaux de réparation
  
- ▶ Aucune information claire sur le comportement différent de la tranche 2

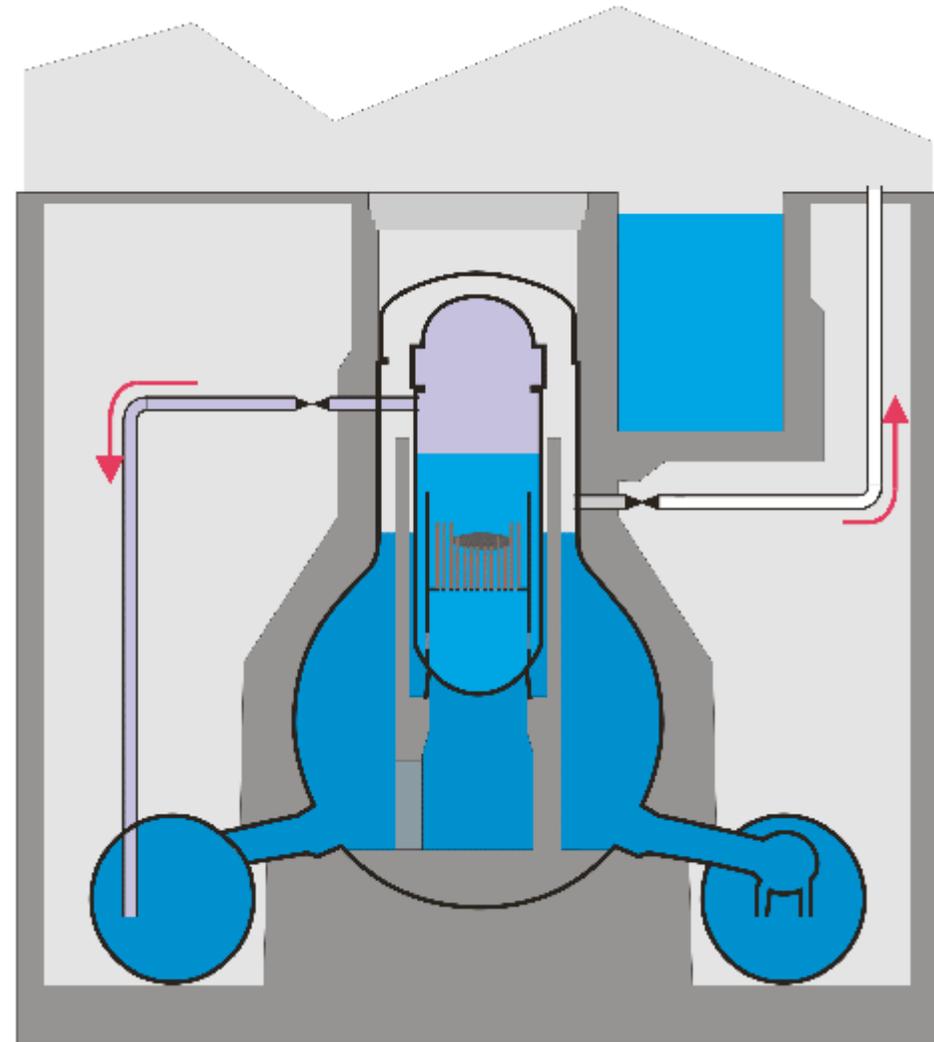


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 2. Progression de l'accident

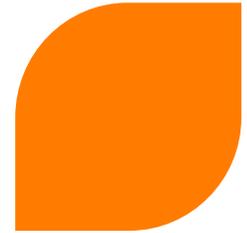


- ▶ Etat actuel des réacteurs
  - ◆ Coeur endommagé en tranches 1,2,3
  - ◆ Bâtiments endommagés du fait d'incendies divers en tranches 1-4
  - ◆ Cuves du réacteur remplis avec des pompes mobiles sur toutes les tranches
  - ◆ A minima, enceinte de confinement remplie sur la tranche 1
  
- ▶ Poursuite du refroidissement des réacteur via rejet vapeur à l'atmosphère
  
- ▶ Désormais, seuls de petits rejets de produits de fission peuvent être envisagés



# L'incident de Fukushima Daiichi

## 3. Rejets radioactifs

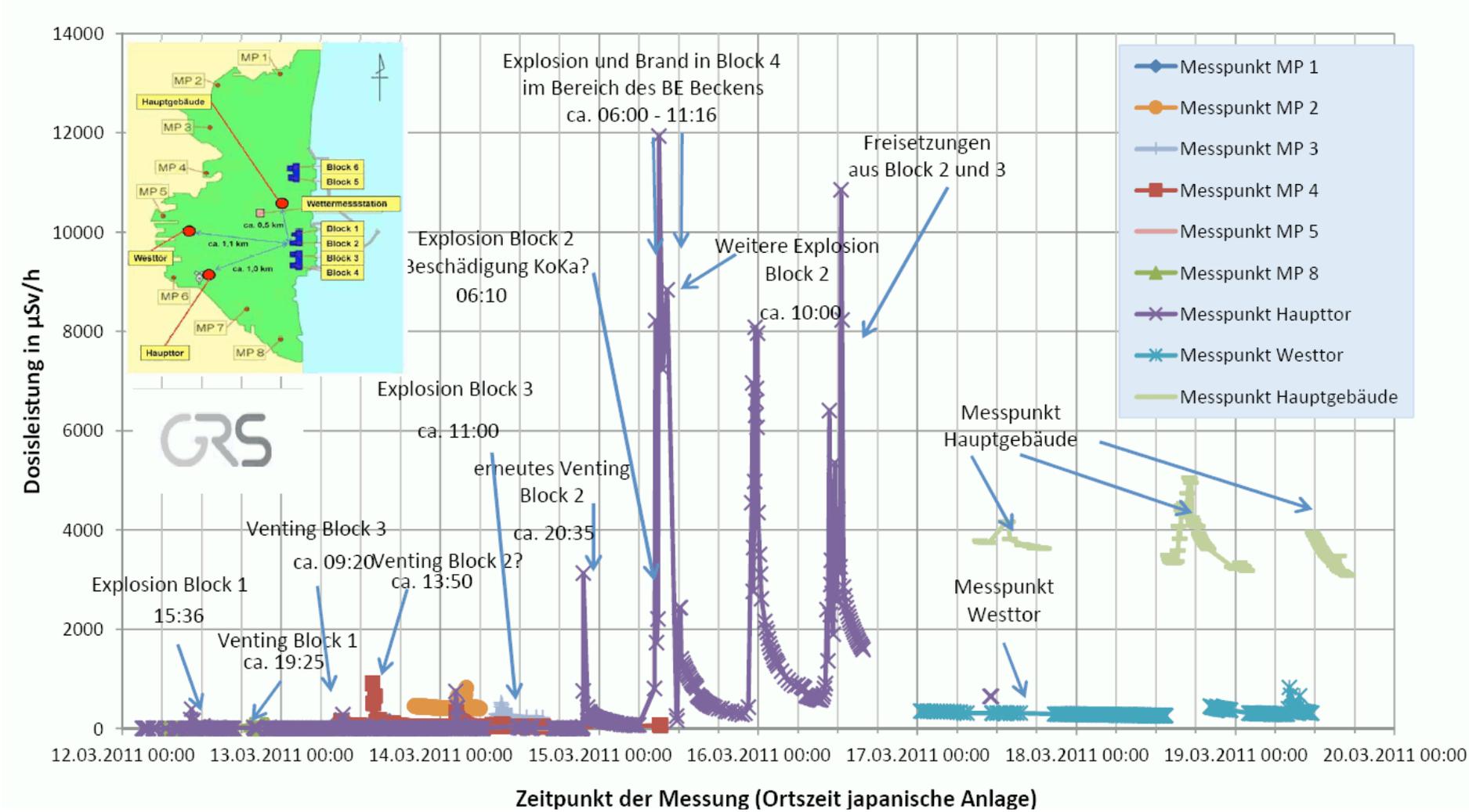
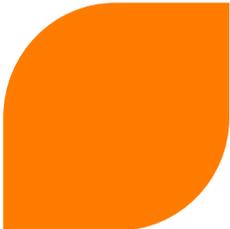


### ► Directement sur le site

- ◆ Avant explosion de la tranche 2
  - Inférieur à 2mSv / h
  - Essentiellement du au rejet de gaz rares
  - Balises côté ouest. La mesure peut être sous-estimée du fait du vent.
  
- ◆ Après explosion de la tranche 2 (endommagement de l'enceinte)
  - Valeurs pics temporaires 12mSv / h
  - (Origine pas complètement éclaircie)
  - Valeurs pics locales sur le site jusqu'à 400mSv /h (rupture enceinte / fragments?)
  - Dose stable actuelle sur le site à 5mSv /h
  - Beaucoup plus à l'intérieur des bâtiments
  
- ◆ La limitation du temps d'exposition des intervenants est nécessaire

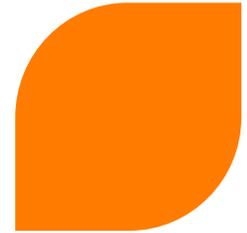
# L'incident de Fukushima Daiichi

## 3. Rejets radioactifs



# L'incident de Fukushima Daiichi

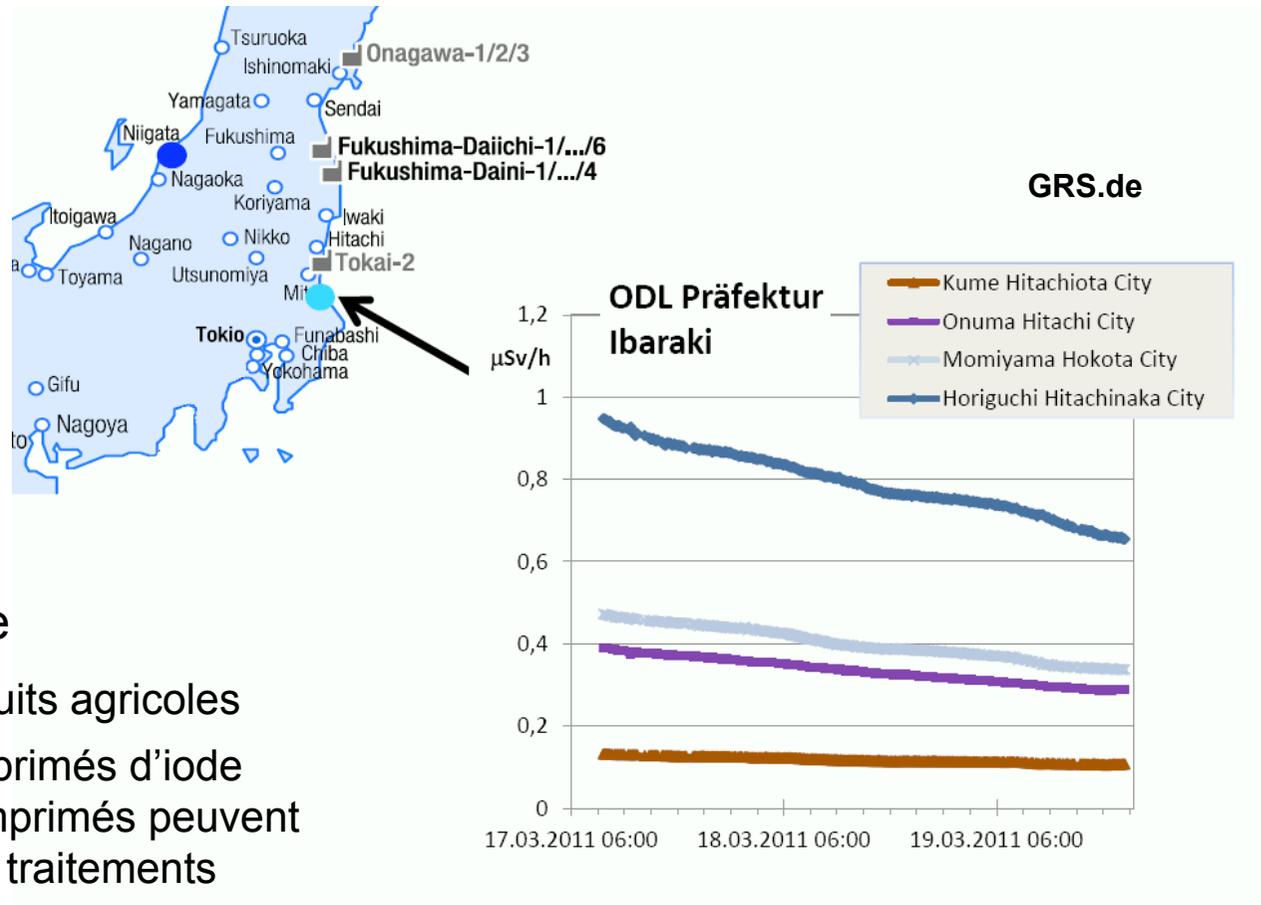
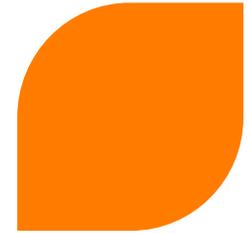
## 3. Rejets radioactifs



- ▶ En dehors du site
  - ◆ Comme les bâtiments réacteurs sont globalement intacts  
=> rejet réduit d'aérosols (pas comme Tchernobyl)
  - ◆ Les produits de fission sont relâchés via la vapeur  
=> augmentation des aérosols rapide, mais une large fraction tombe à proximité du site
  - ◆ La dose à l'extérieur du site est principalement due aux gaz rares
  - ◆ Transport / diffusion par le vent, baisse de la dose dans le temps
  - ◆ Pas de "retombée" des gaz rares, donc pas de forte contamination locale des sols
  
- ▶ ~20km autour du site
  - ◆ Les évacuations sont adaptées
  - ◆ Des débits de dose maximaux de 0,3mSv/h ont été mesurés sur de courtes périodes
  - ◆ Destruction de produits végétaux / animaux possible cette année
  - ◆ Evacuation permanente de la zone probablement non nécessaire

# L'incident de Fukushima Daiichi

## 3. Rejets radioactifs



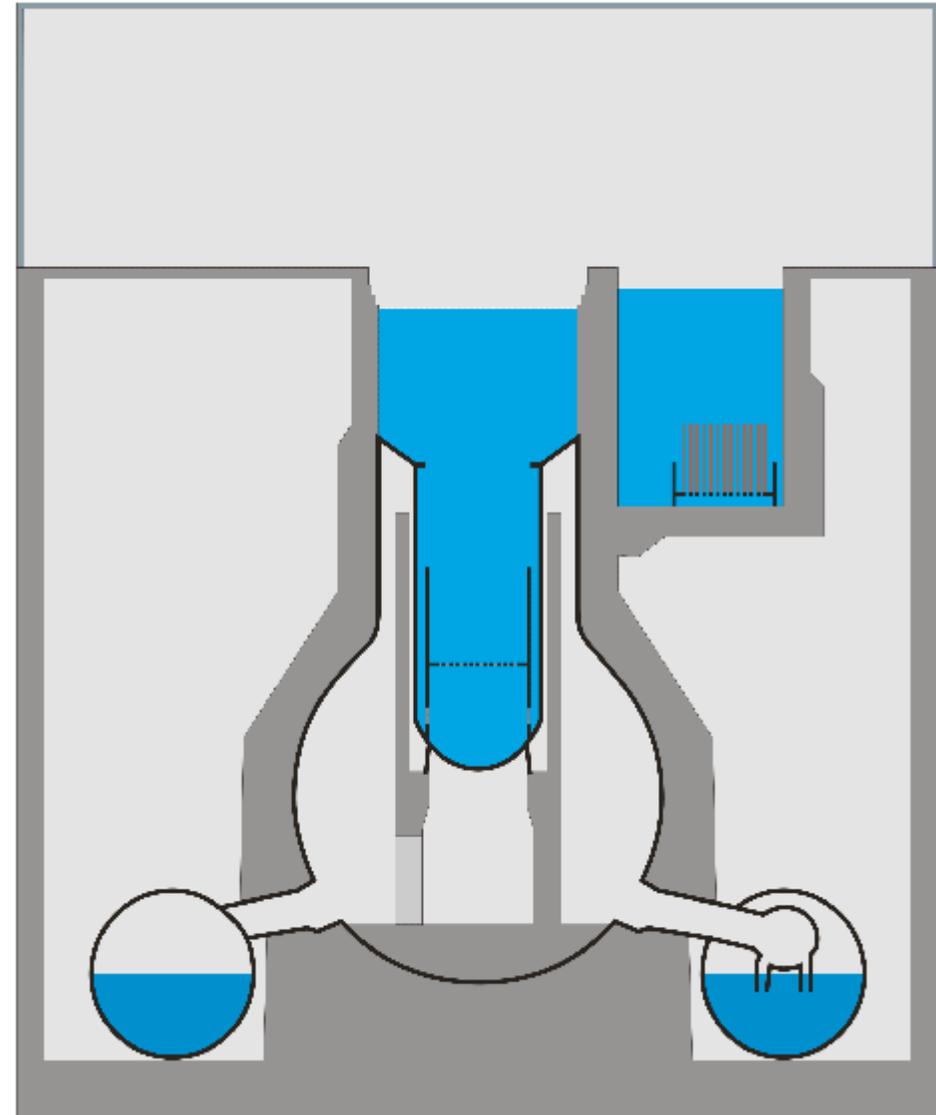
- ▶ ~50km autour du site
  - ◆ Contrôle des produits agricoles
  - ◆ Utilisation de comprimés d'iode (Attention, les comprimés peuvent interférer avec les traitements cardiaques)

# L'incident de Fukushima Daiichi

## 4. Piscines de désactivation



- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
  - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
  - ◆ Assèchement des piscines
    - Tranche 4: en 10 jours
    - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
  - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**
  
- ▶ Conséquences
  - ◆ Fusion du coeur en air
  - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
  - ◆ Rejets importants

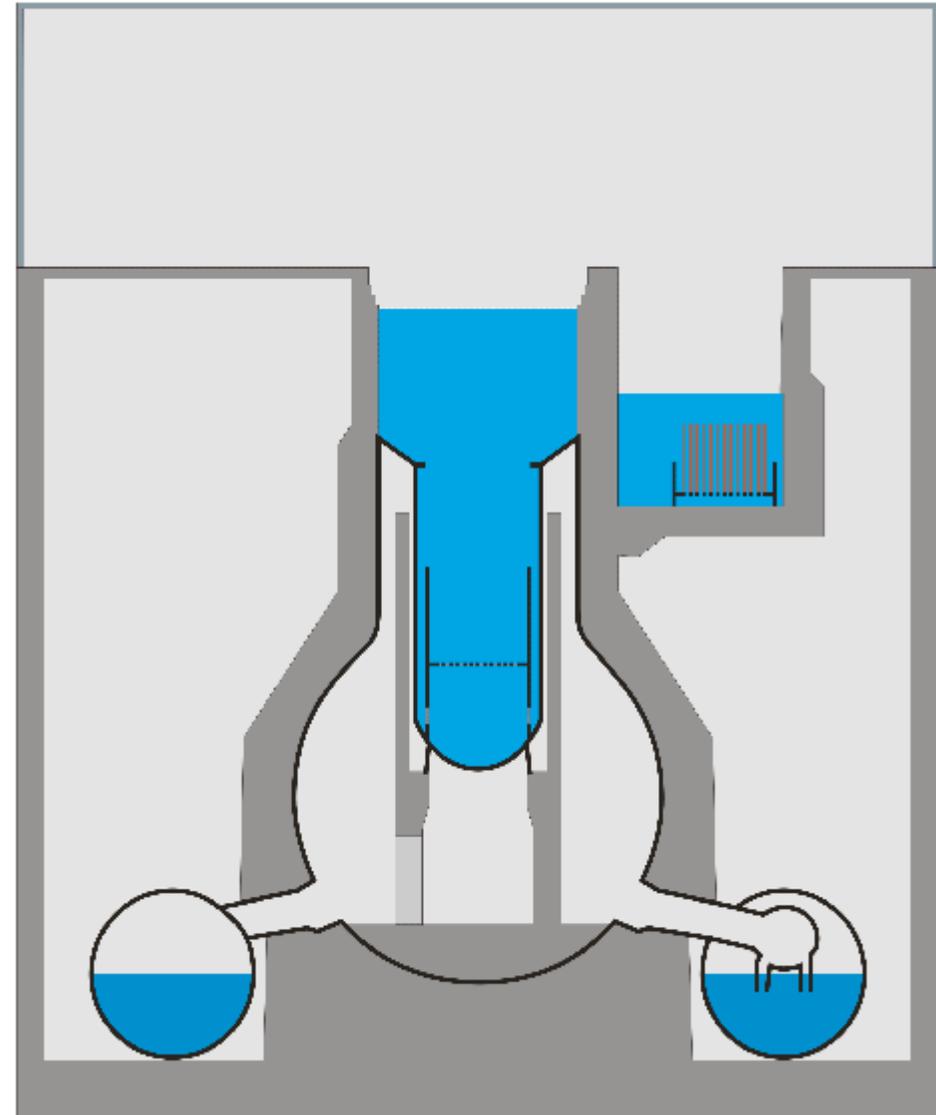


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 4. Piscines de désactivation



- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
  - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
  - ◆ Assèchement des piscines
    - Tranche 4: en 10 jours
    - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
  - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**
  
- ▶ Conséquences
  - ◆ Fusion du coeur en air
  - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
  - ◆ Rejets importants

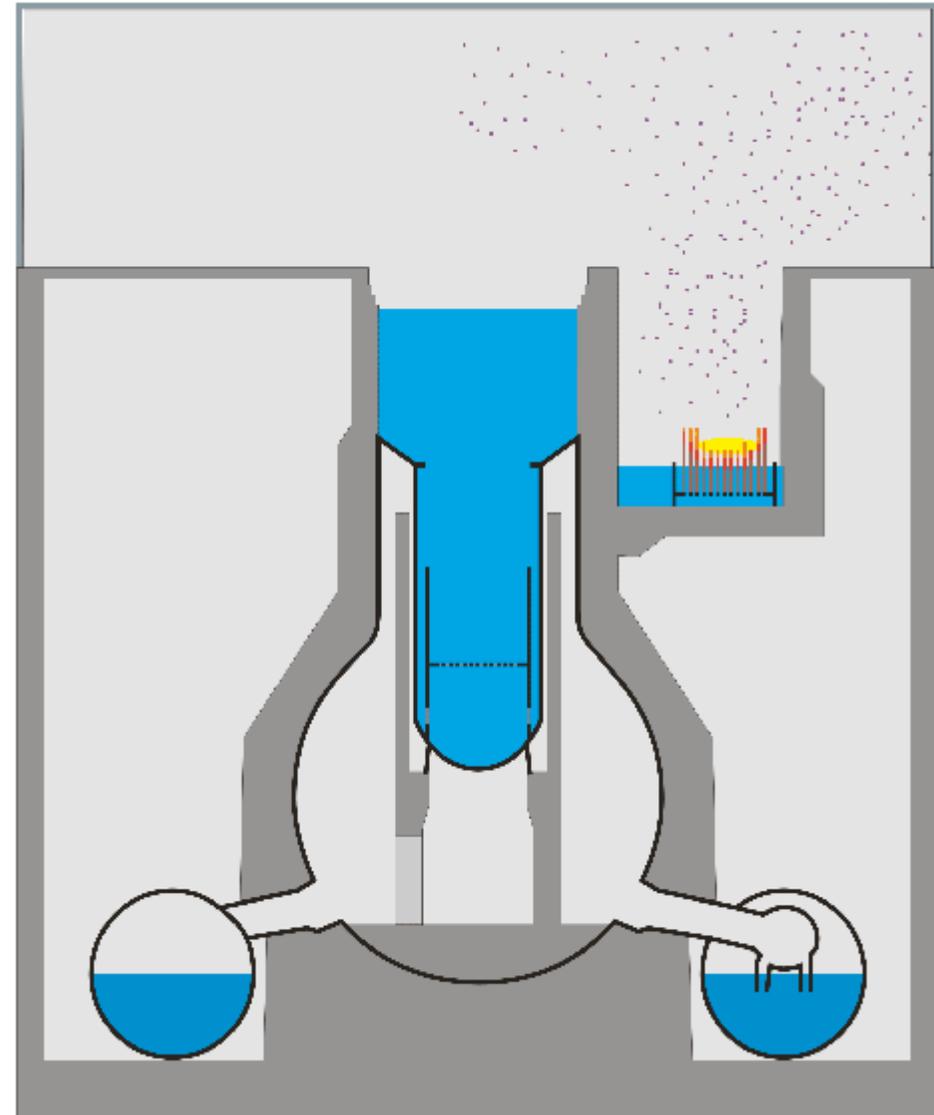


# L'incident de Fukushima Daiichi

## 4. Piscines de désactivation

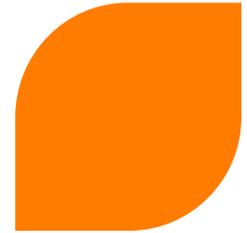


- ▶ La piscine de désactivation est située sur le plancher de service
  - ◆ Du fait de la maintenance, tous les éléments du coeur de la tranche 4 étaient en piscine de désactivation
  - ◆ Assèchement des piscines
    - Tranche 4: en 10 jours
    - Tranches 1-3,5,6 en quelques semaines
  - ◆ **Fuites des piscines du fait du séisme ?**
  
- ▶ Conséquences
  - ◆ Fusion du coeur en air
  - ◆ Presque pas de rétention des produits de fission
  - ◆ Rejets importants
  - ◆ **Il n'est pas clair actuellement s'il y a déjà eu des rejets depuis les piscines**



# L'incident de Fukushima Daiichi

## 5. Sources d'information



### ▶ Bonnes sources d'information

#### ◆ Gesellschaft für Reaktorsicherheit [GRS.de]

- A jour
- Publication des données radiologiques
- Traduction en allemand des pages web en japonais ou anglais

#### ◆ Japan Atomic Industrial Forum [jaif.or.jp/english/]

- Etat courant des tranches
- Des mesures issues des réacteurs (pression et niveau)

#### ◆ Tokyo Electric Power Company [Tepco.co.jp]

- Etat des travaux de réparation
- Victimes

### ▶ Il est probable que trop peu d'information soit diffusée par TEPCO, l'exploitant de la centrale