

**COPPE UFRJ  
Abril 2011**

**Aula Inaugural  
“Lições do Acidente de Fukushima”**

**Luiz Soares  
Diretor Técnico  
Eletrobras Eletronuclear**

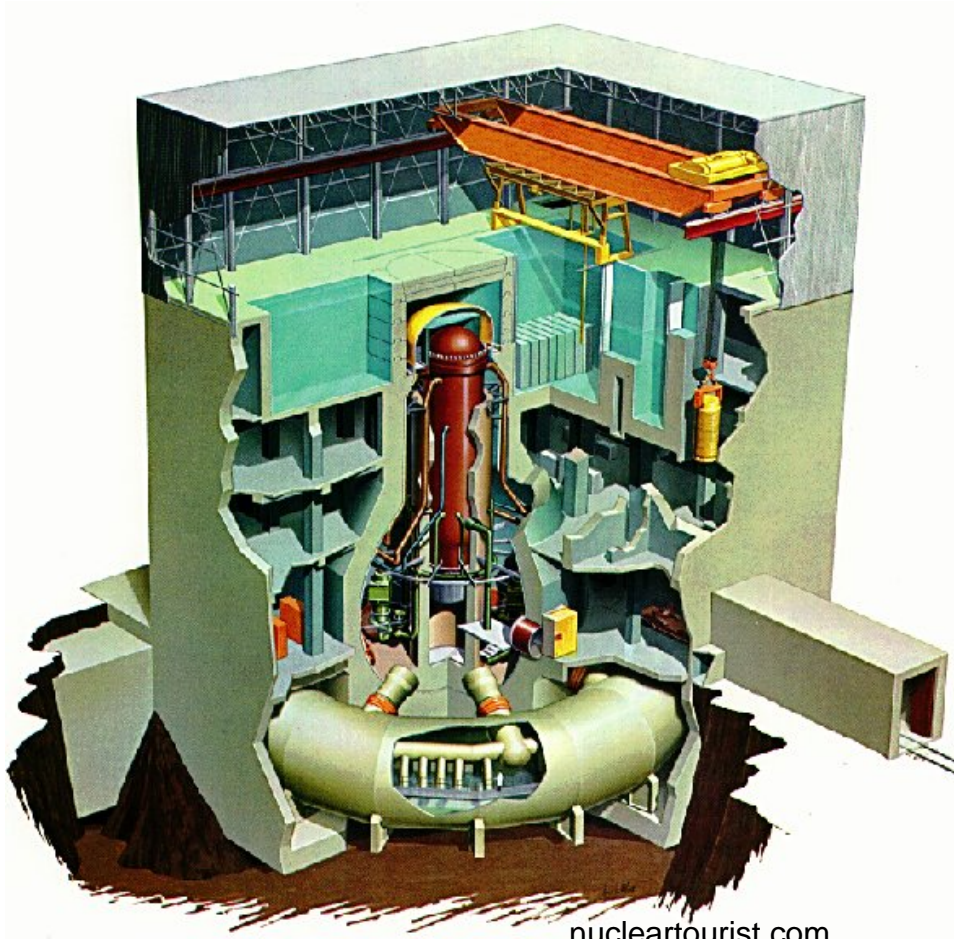


# Fukushima Daiichi Nuclear Power Station









nucleartourist.com



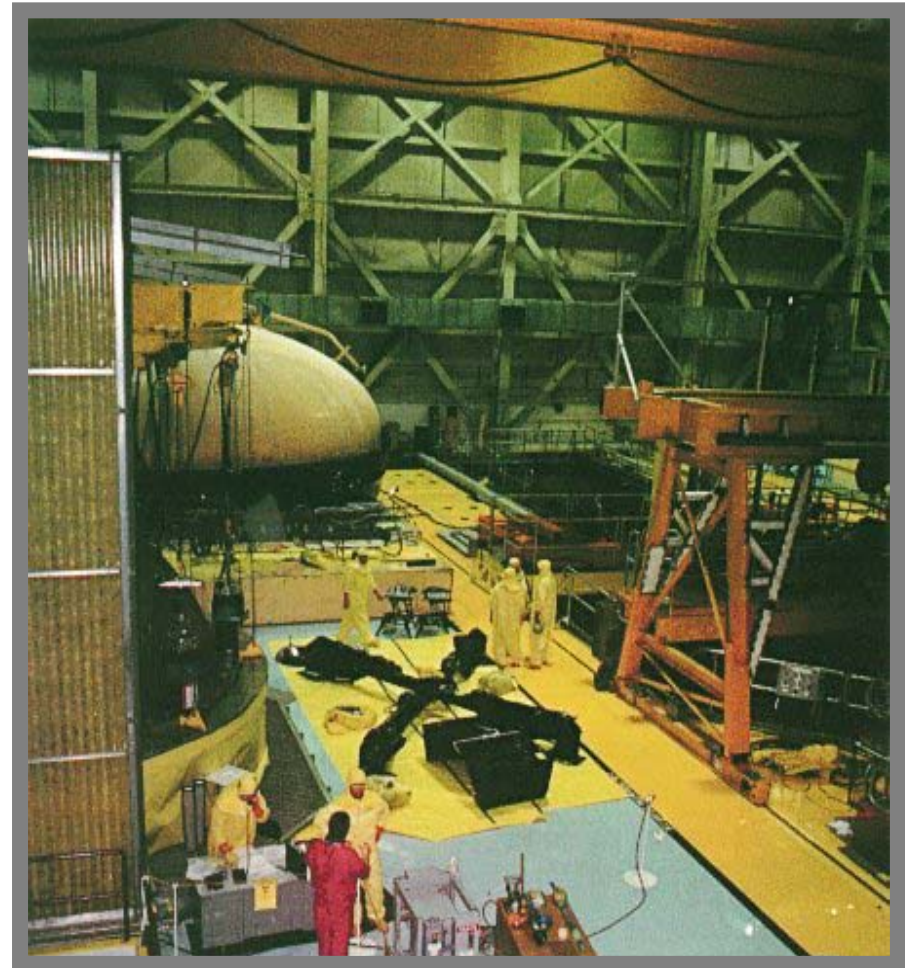


## Service Floor

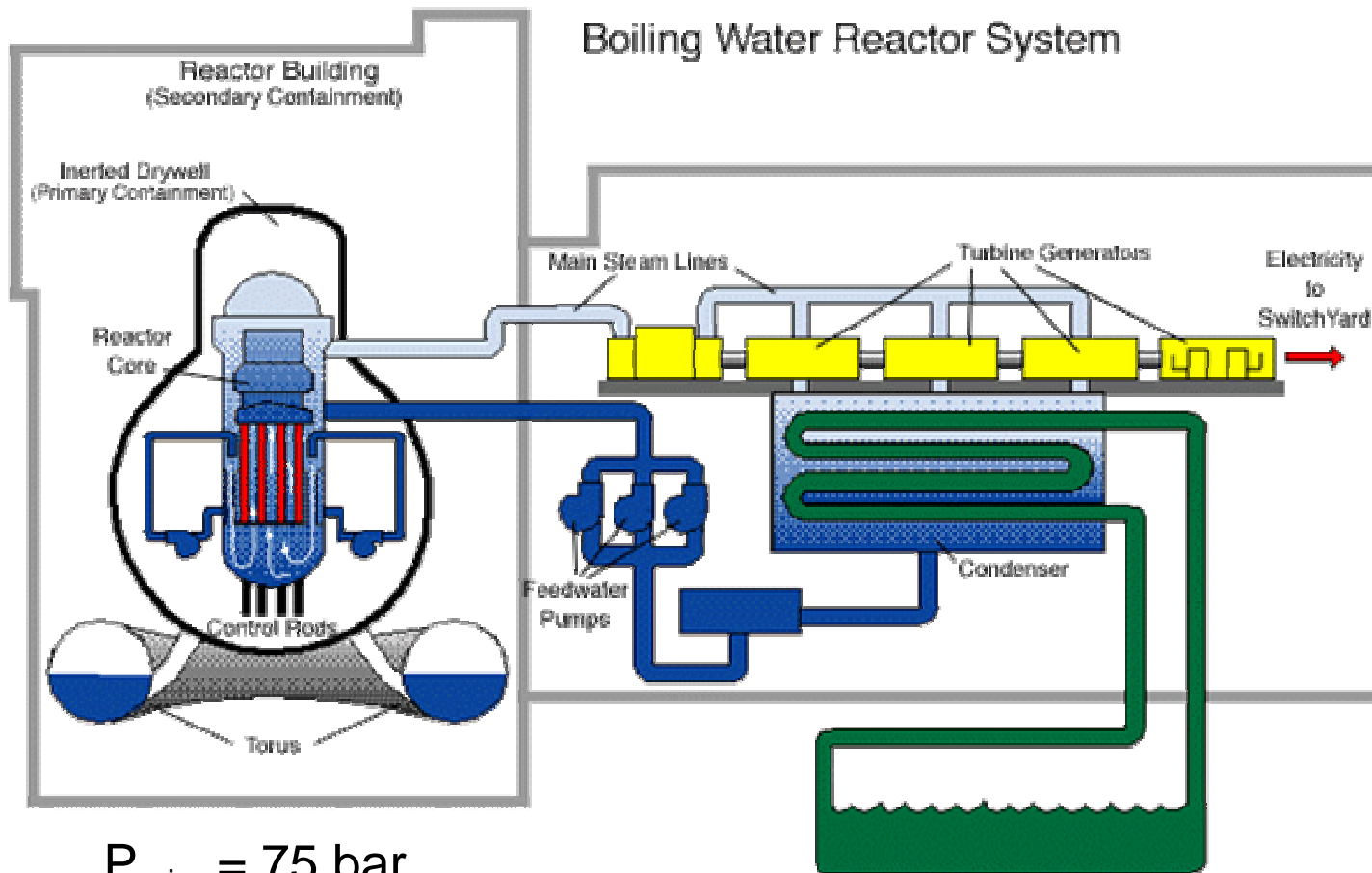




## Abertura e fechamento do containment

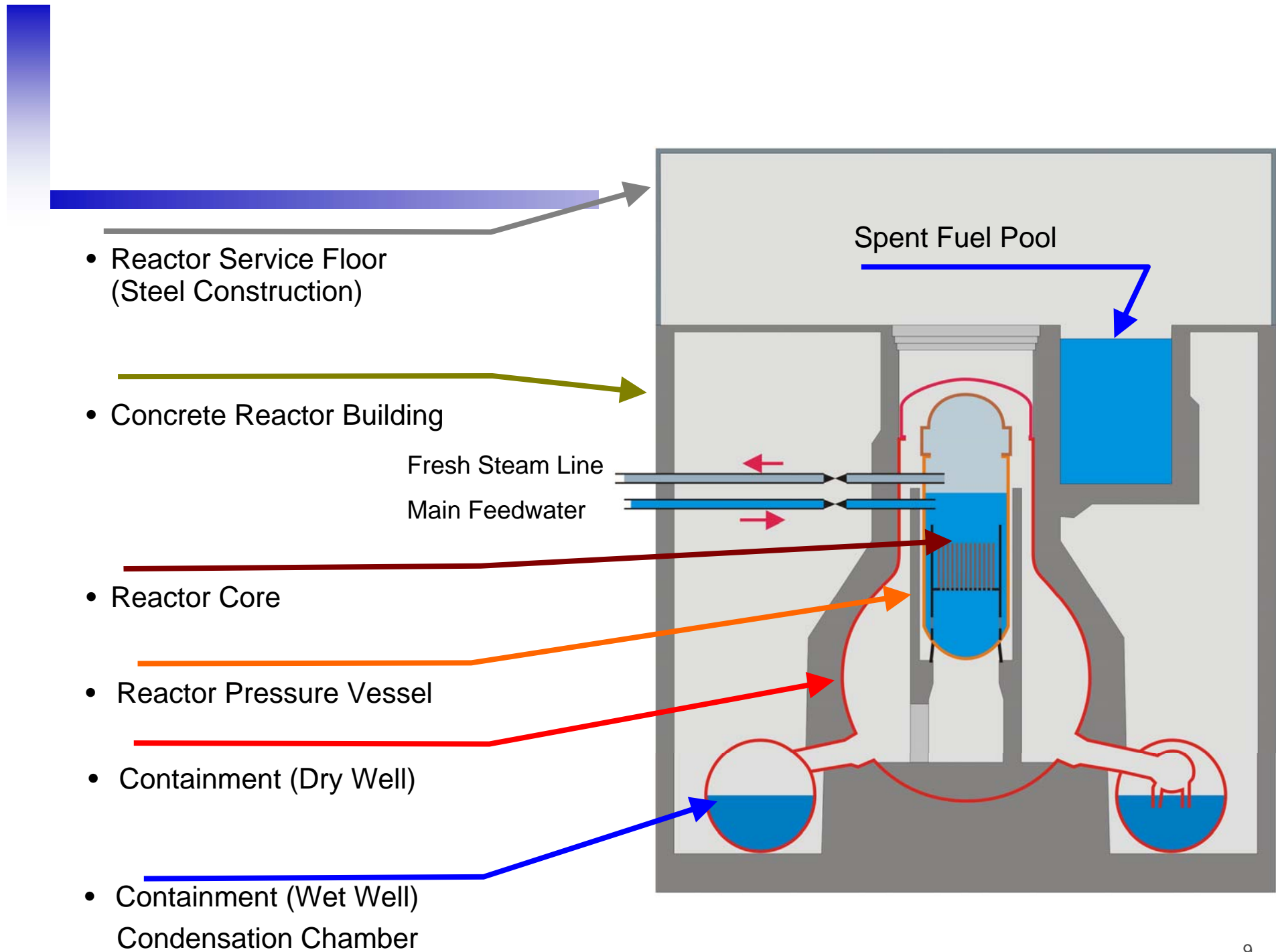


## Esquema Simplificado de uma Usina BWR

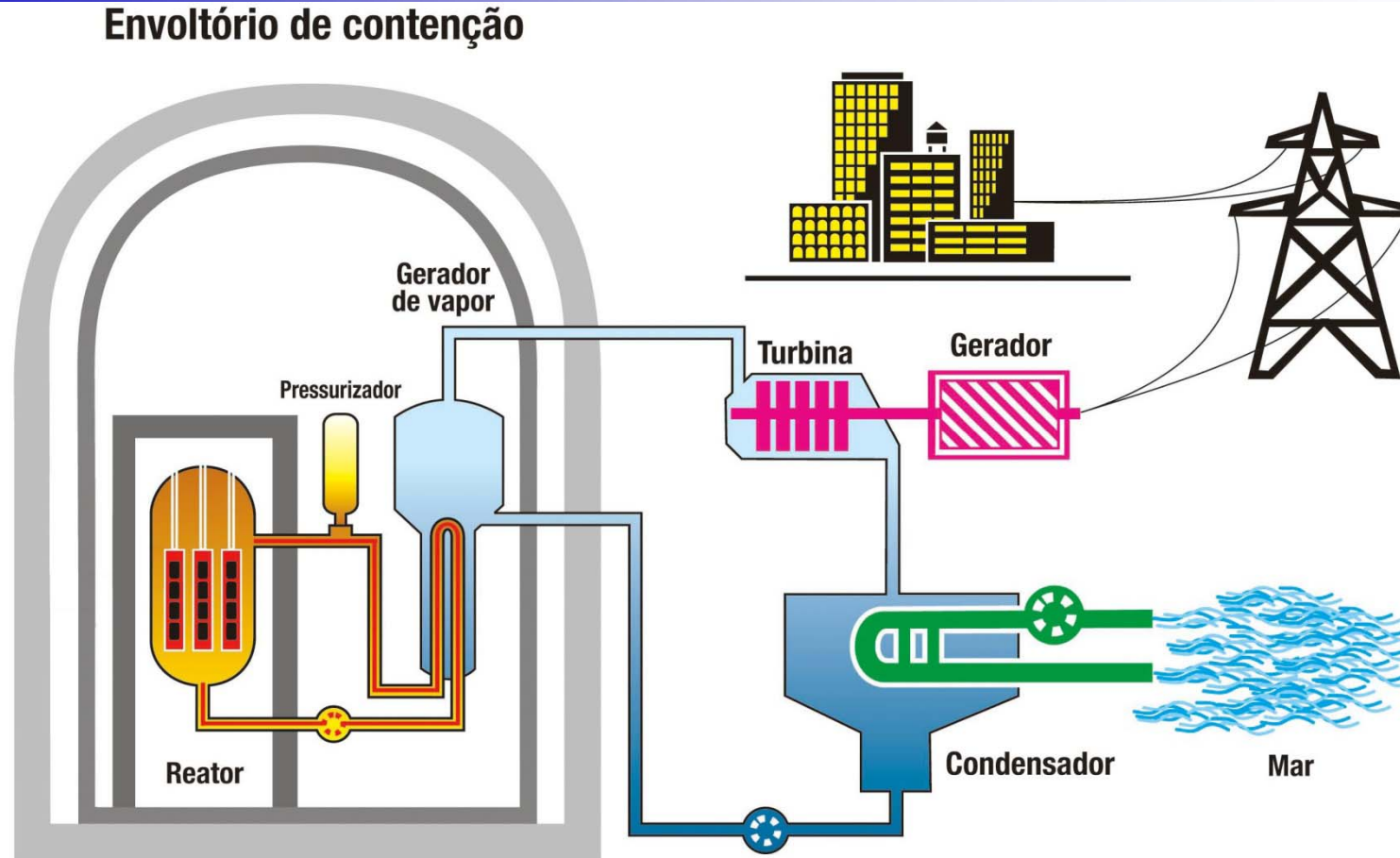


$$P_{\text{prim}} = 75 \text{ bar}$$
$$T_{\text{prim}} = 285 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



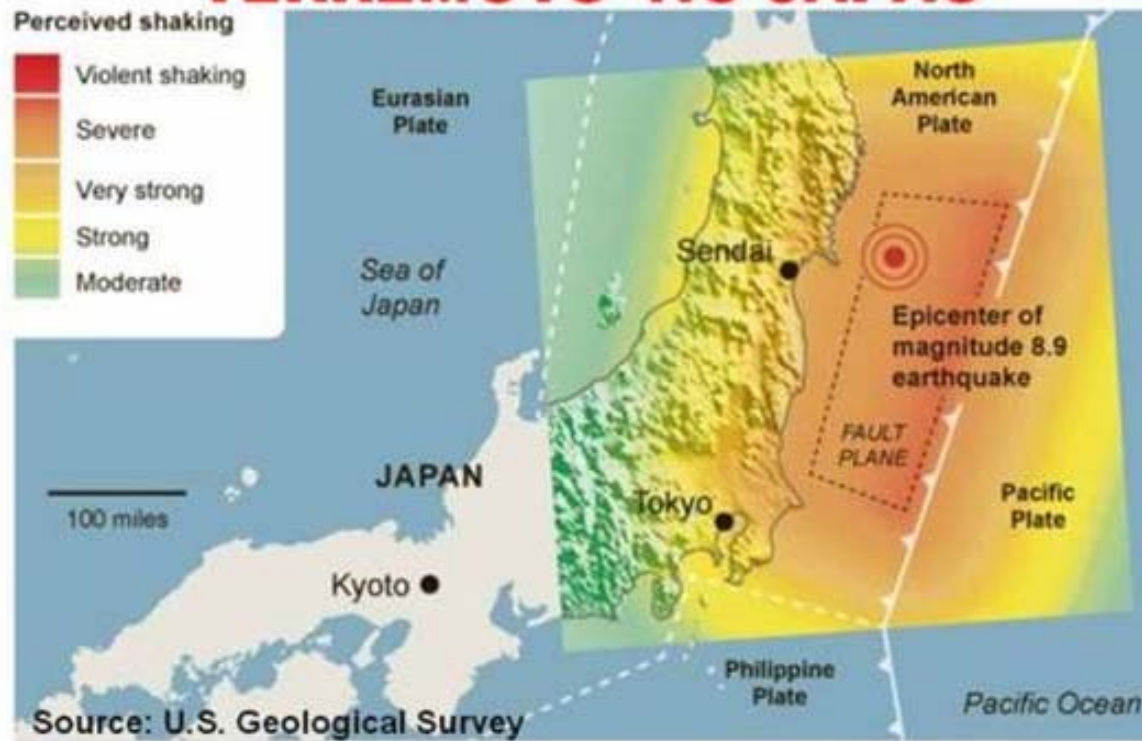


## Esquema Simplificado de uma Usina PWR



$$P_{\text{prim}} = 158 \text{ bar}$$
$$T_{\text{prim}} = 326 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

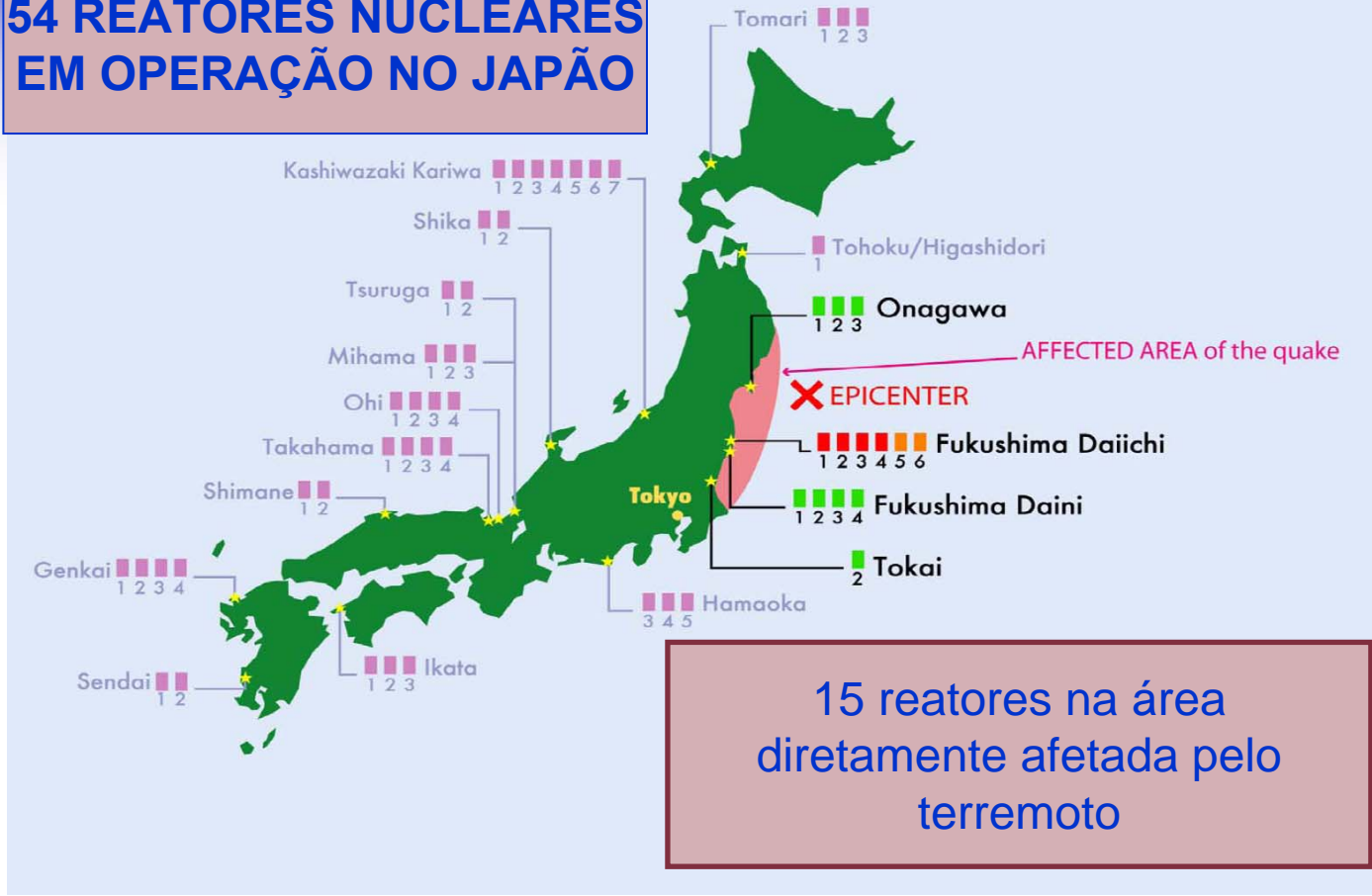
## TERREMOTO NO JAPÃO



Às 14:46 do dia 11 de março de 2011, hora local, o nordeste do Japão foi atingido por um terremoto de 8,9 graus na escala Richter, com epicentro próximo da costa.



# 54 REATORES NUCLEARES EM OPERAÇÃO NO JAPÃO



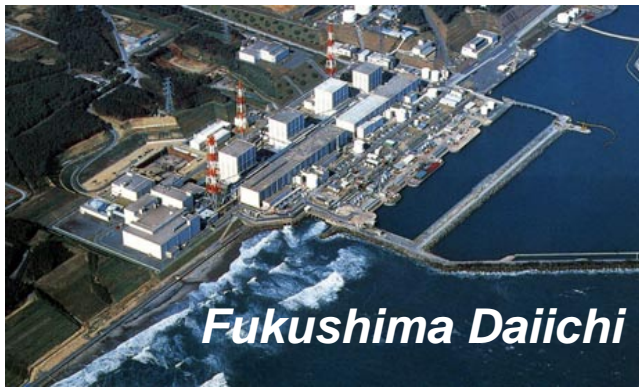
15 reatores na área diretamente afetada pelo terremoto



Onagawa



Fukushima Daini

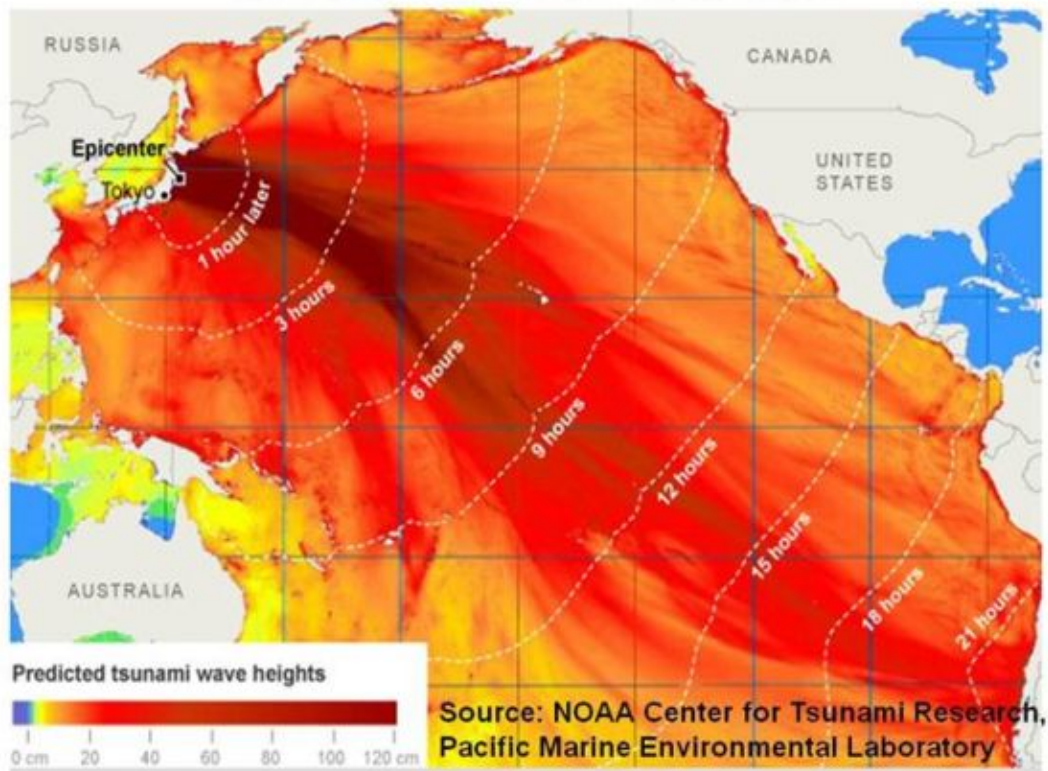


Fukushima Daiichi



Tokai

## TSUNAMI NO JAPÃO

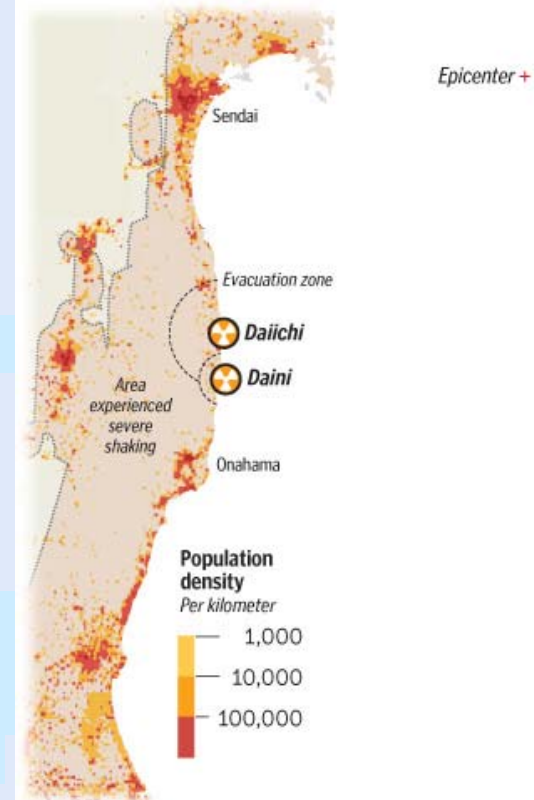
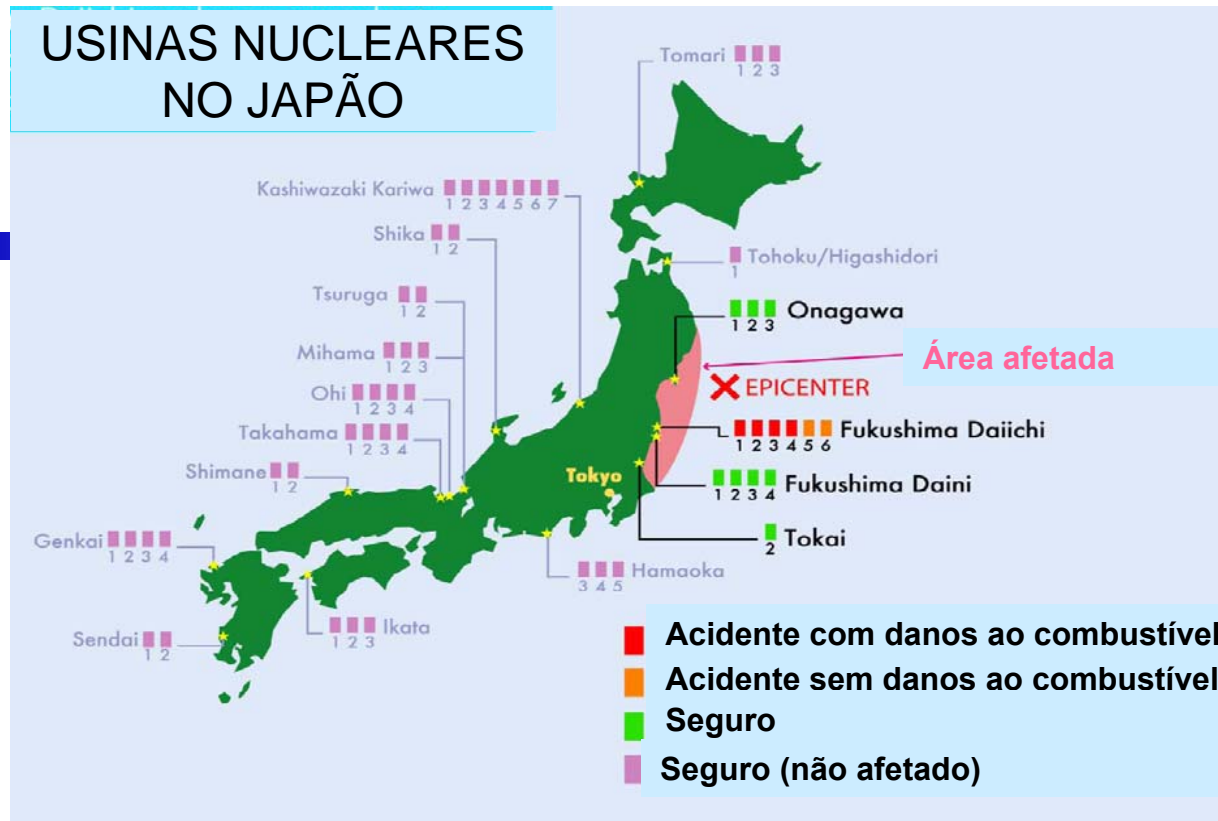


Cerca de 1 hora após o terremoto, ocorreu uma onda tsunami que alcançou 10 metros de altura varreu a costa, penetrando vários quilômetros terra adentro.





## USINAS NUCLEARES NO JAPÃO



As 8 usinas das centrais nucleares de Onagawa, Fukushima Daini e Tokai resistiram a mais esse evento.

4 usinas de Fukushima Daiichi não resistiram

- ondas de 10m invadem a Central de Fukushima;
- todos os grupos diesel da Central atingidos;
- tanques de óleo diesel destruídos;
- sistemas de segurança sem suprimento elétrico;
- refrigeração do núcleo dos reatores comprometida.



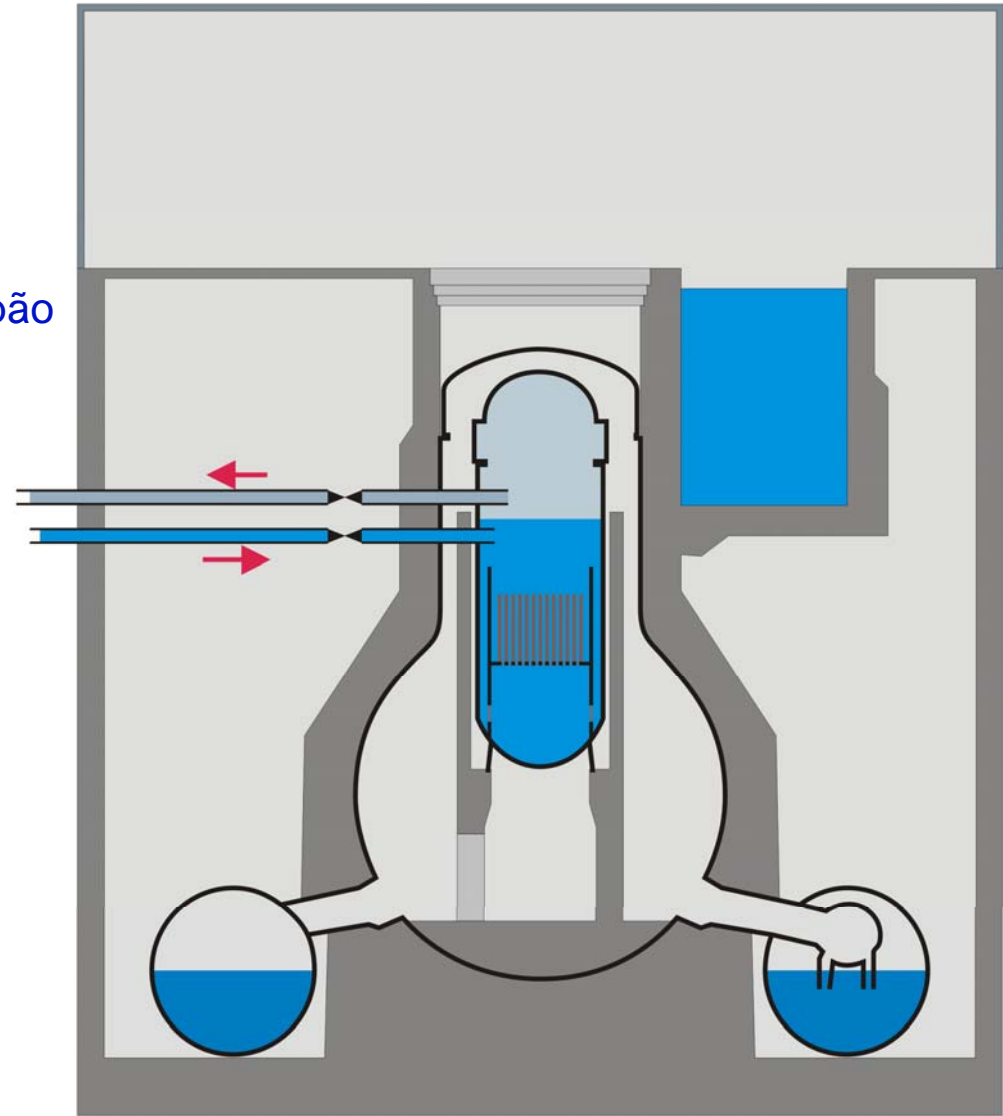


**O Tsunami provocou falhas que causaram severos danos, que têm dificultado levar as usinas a uma condição final segura**



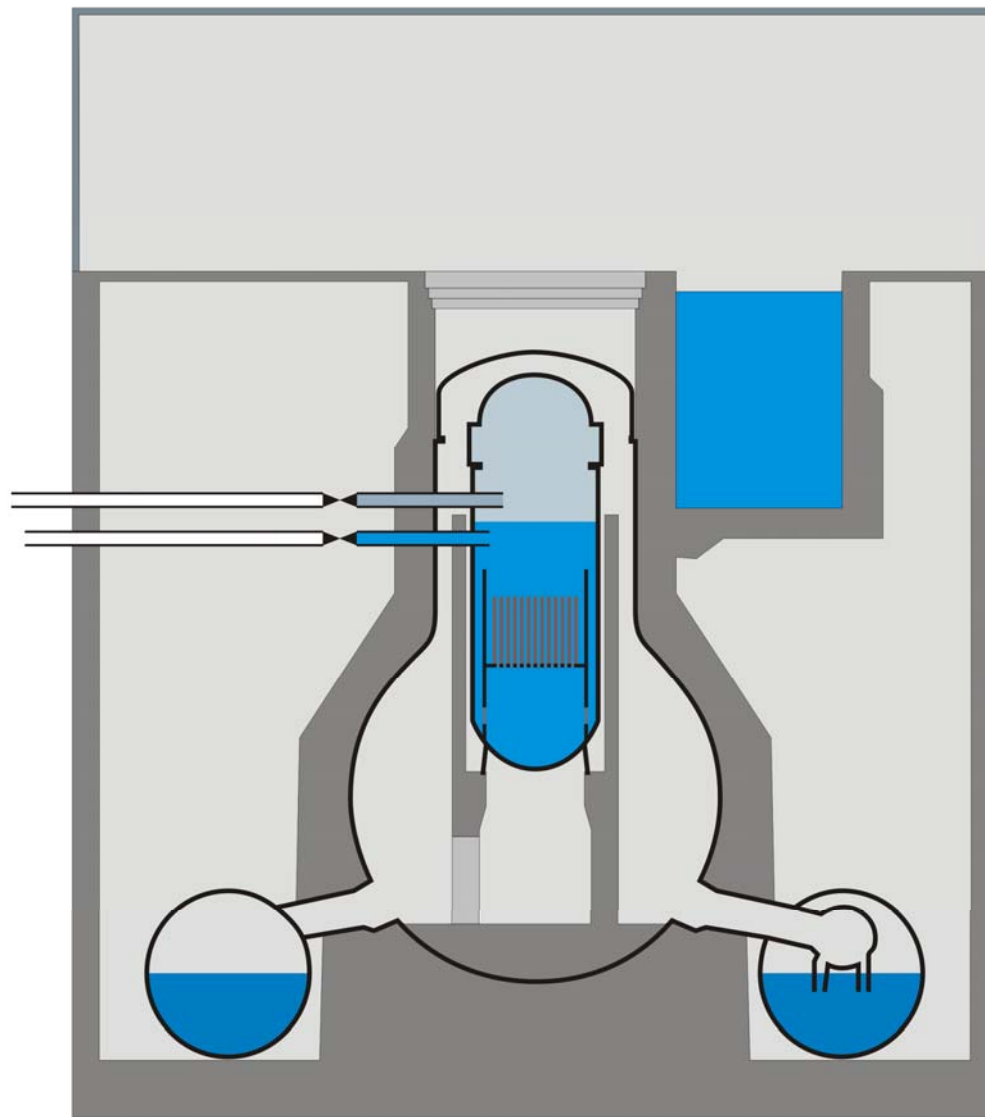
# Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- 11.3.2011 (14:46) - Terremoto
  - Magnitude 9
  - Perda do sistema elétrico no NE do Japão
  - Reatores desligam de forma segura
- SCRAM
  - Encerra a fissão nuclear
  - Geração de calor devido ao Calor de Decaimento dos produtos de fissão
    - Depois do Scram ~6%
    - Depois de 1 dia ~1%
    - Depois de 5 dia ~0.5%



## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

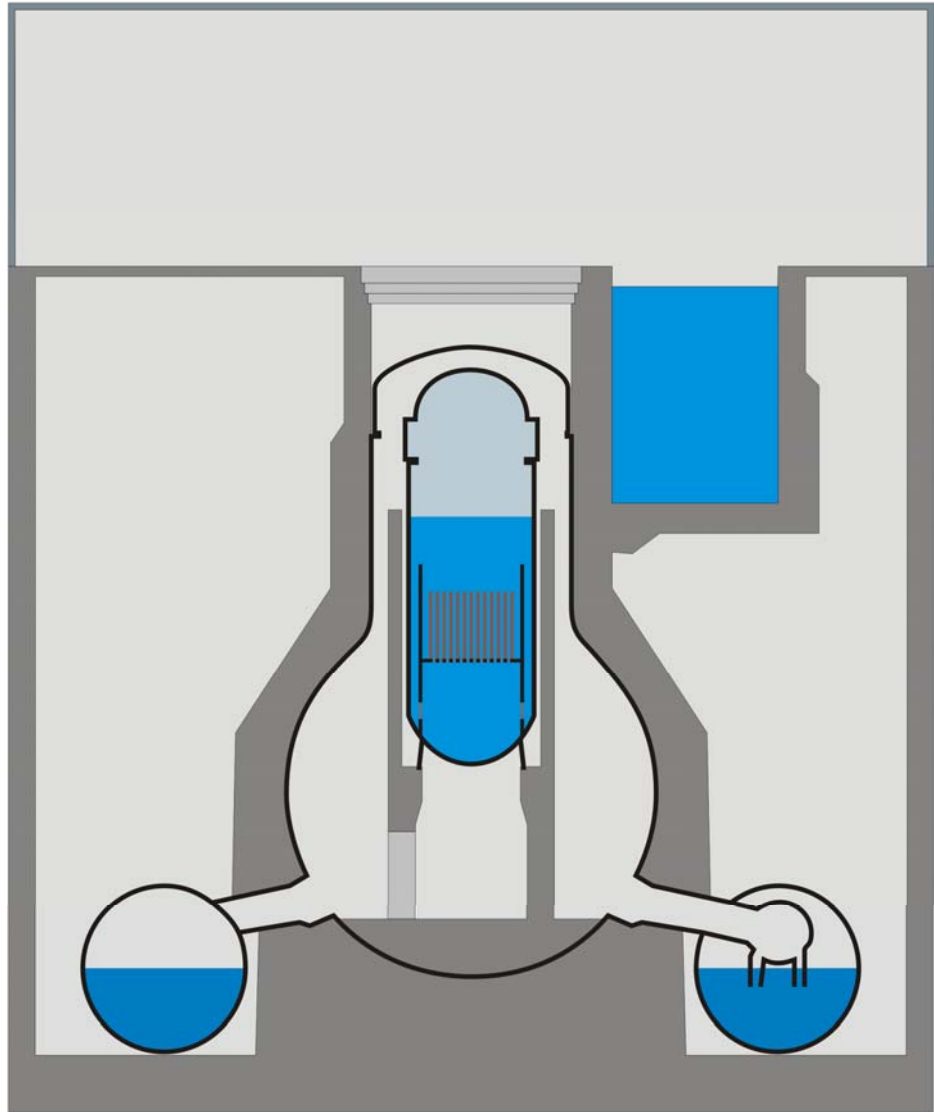
- Isolamento da Contenção realizado com sucesso
- Partida dos Geradores Diesel
- Sistemas de Resfriamento do Núcleo foram alimentados
- Usinas estáveis e seguras





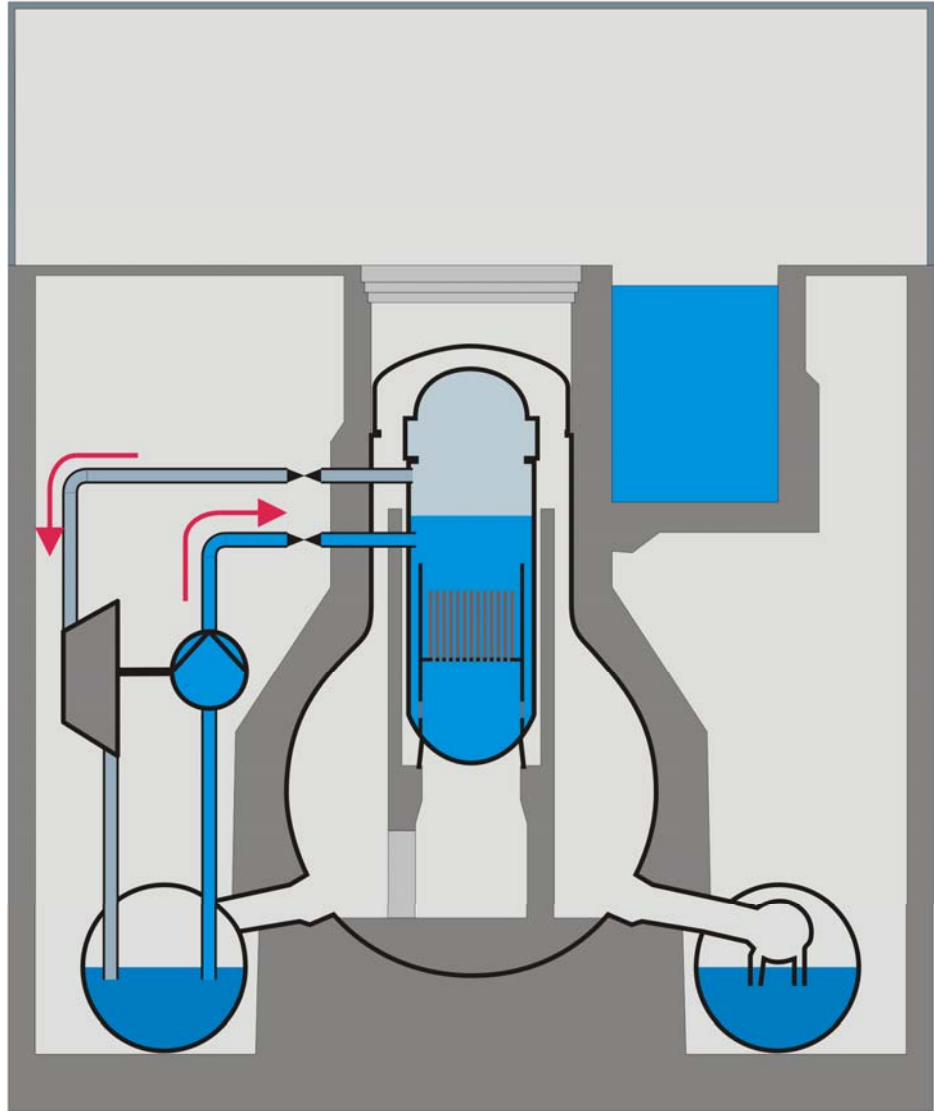
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- 15:41 Tsunami atinge a Usina
  - Plant Design para Tsunami de altura = 6.5m
  - Altura da Tsunami >12m
  - Inundação dos Geradores Diesel e do edifício de água de serviço
- Station Blackout
  - Falha comum de alimentação externa
  - Somente baterias disponíveis
  - Somente uma unidade com sistema de alimentação



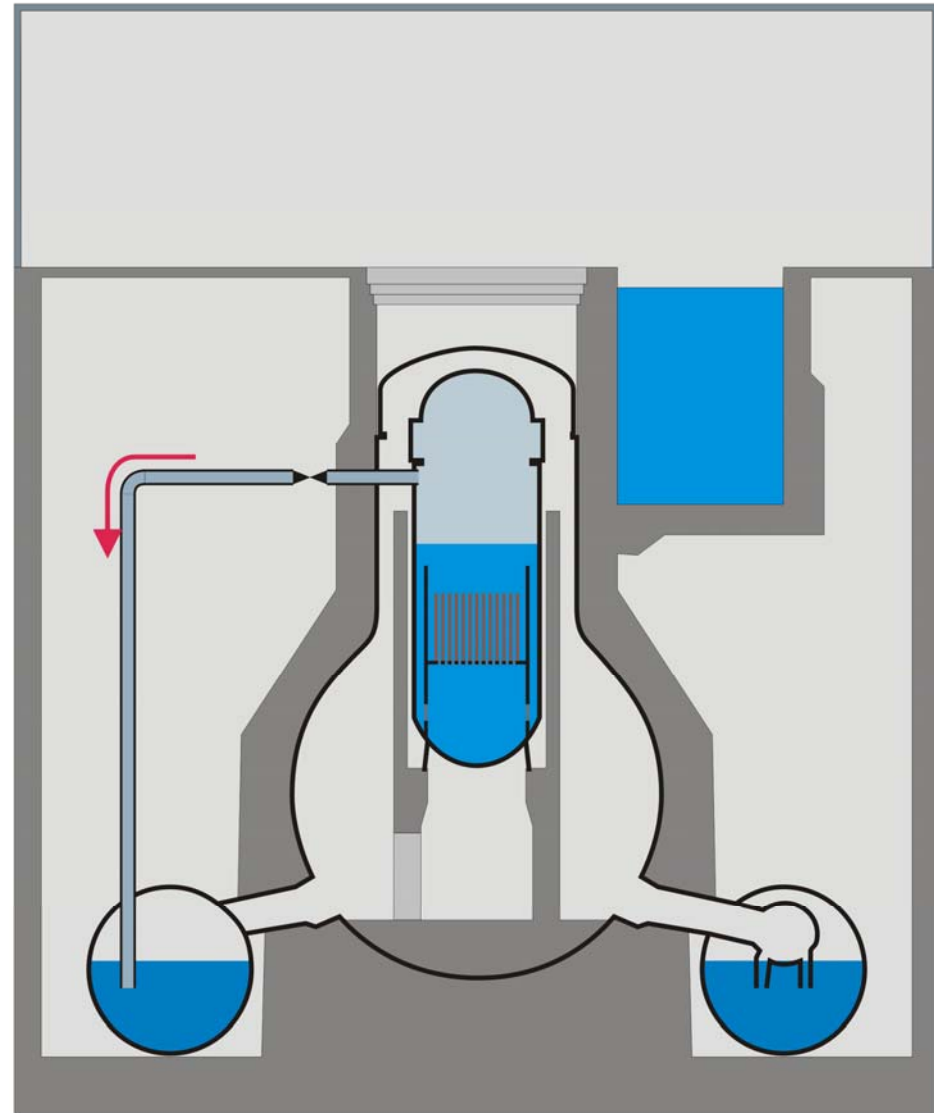
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- Reactor Core Isolation Pump disponível
  - Turbina impulsionada pelo vapor
  - Vapor condensando no Wet Well
  - Turbina girando bomba
  - Água no Wet Well realimentando o reator
  - Para isso, o mínimo necessário eram as baterias e a temperatura no Wet Well abaixo de 100°C
- Como não havia remoção de calor para fora do Edifício, o sistema não poderia funcionar indefinidamente



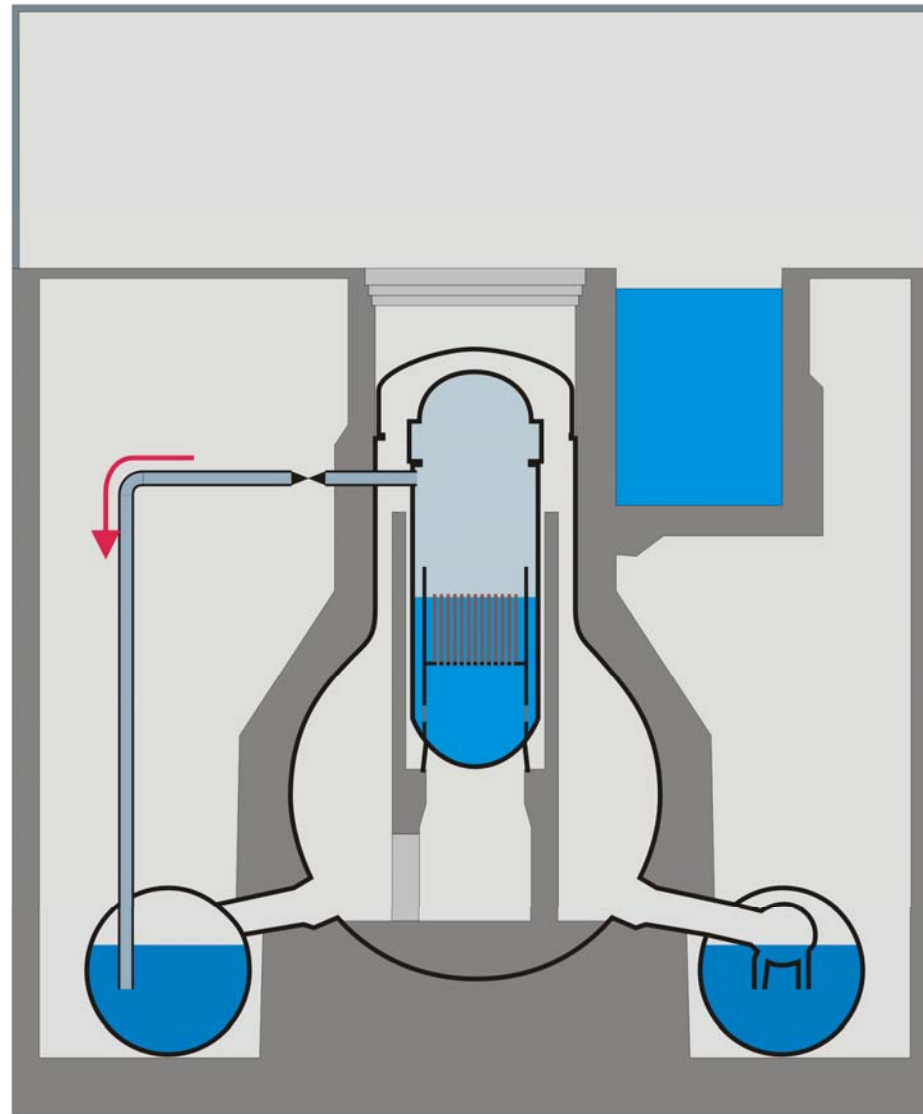
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- Reactor Isolation Pumps inoperáveis:
  - Dia 11.3 - 16:36 na Unidade 1 (baterias descarregadas)
  - Dia 14.3 - 13:25 na Unidade 2 (falha da bomba)
  - Dia 13.3 - 2:44 in Unit 3 (baterias descarregadas)
- Calor de Decaimento ainda produzindo vapor – aumento de pressão
- Abertura das válvulas de alívio e descarga para o Wet Well
- Perda de nível do refrigerante

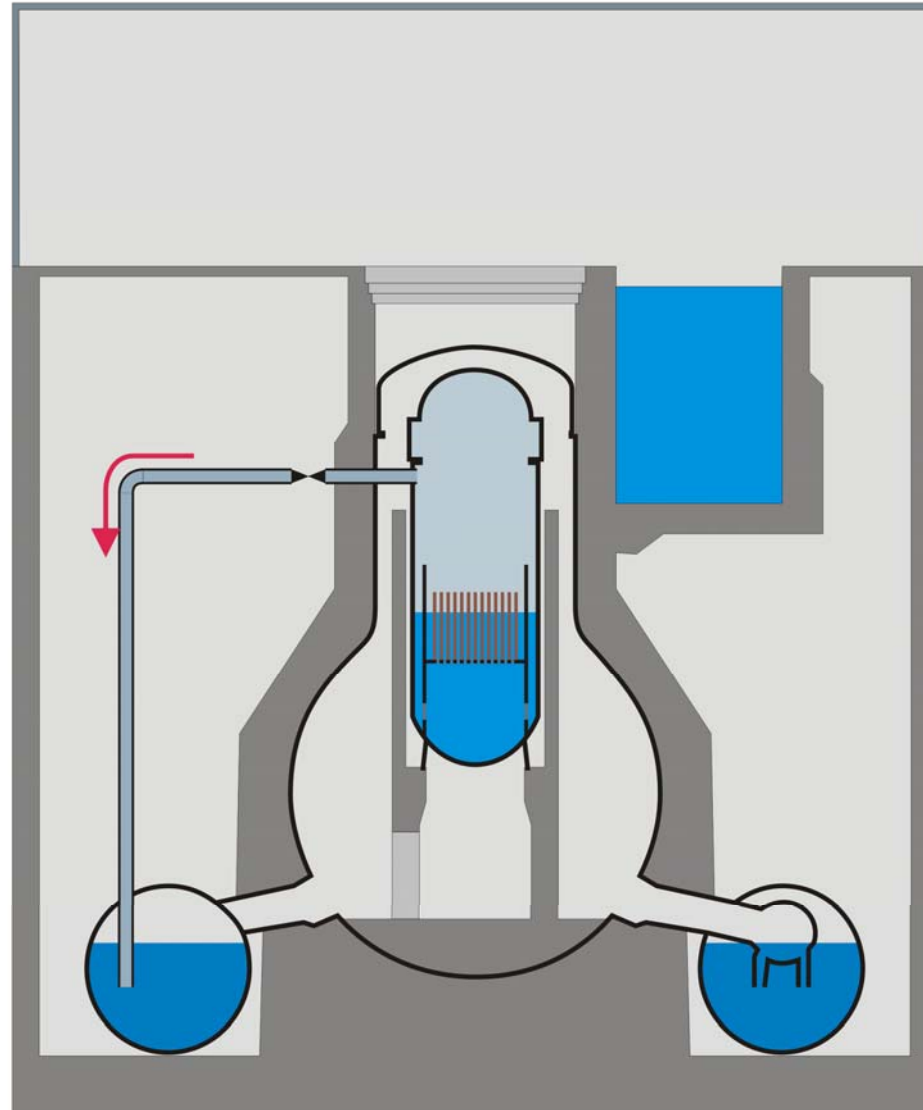




## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

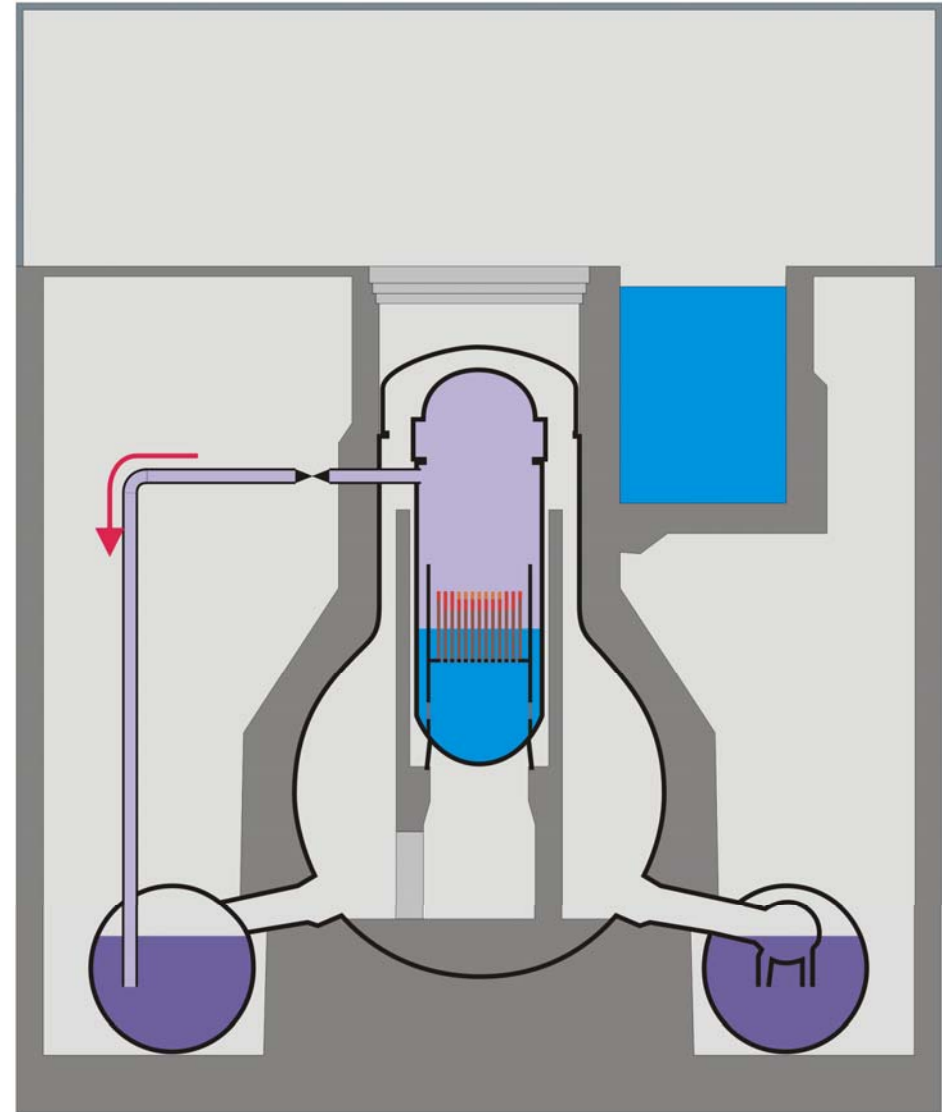


## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente



## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

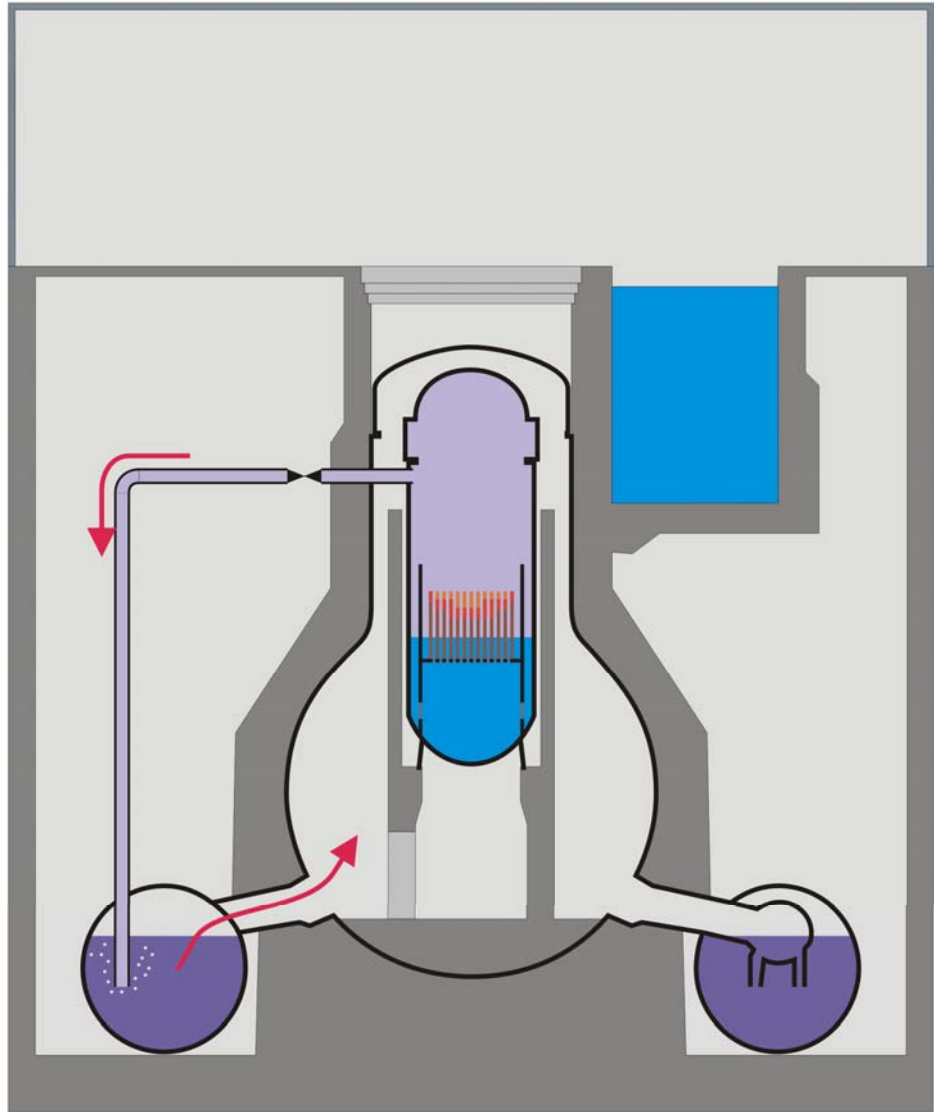
- O nível baixa dramaticamente
- ~50% do núcleo exposto
  - Temperatura do cladding muito alta, mas ainda sem dano no núcleo
- ~2/3 do núcleo exposto
  - Temperatura do cladding  $>900^{\circ}$
  - Ballooning / Quebra do cladding
  - Liberação de produtos radioativos





## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- ~3/4 do núcleo exposto
- Temperatura do Cladding >1200°C
- Zircônio reage com vapor
- $\text{Zr} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$
- Reação exotérmica aumenta calor no núcleo
- Geração de Hidrogênio
  - Unidade 1: 300-600kg
  - Unidades 2/3: 300-1000kg
- H<sub>2</sub> passa pelo Wet Well e vai para a contenção



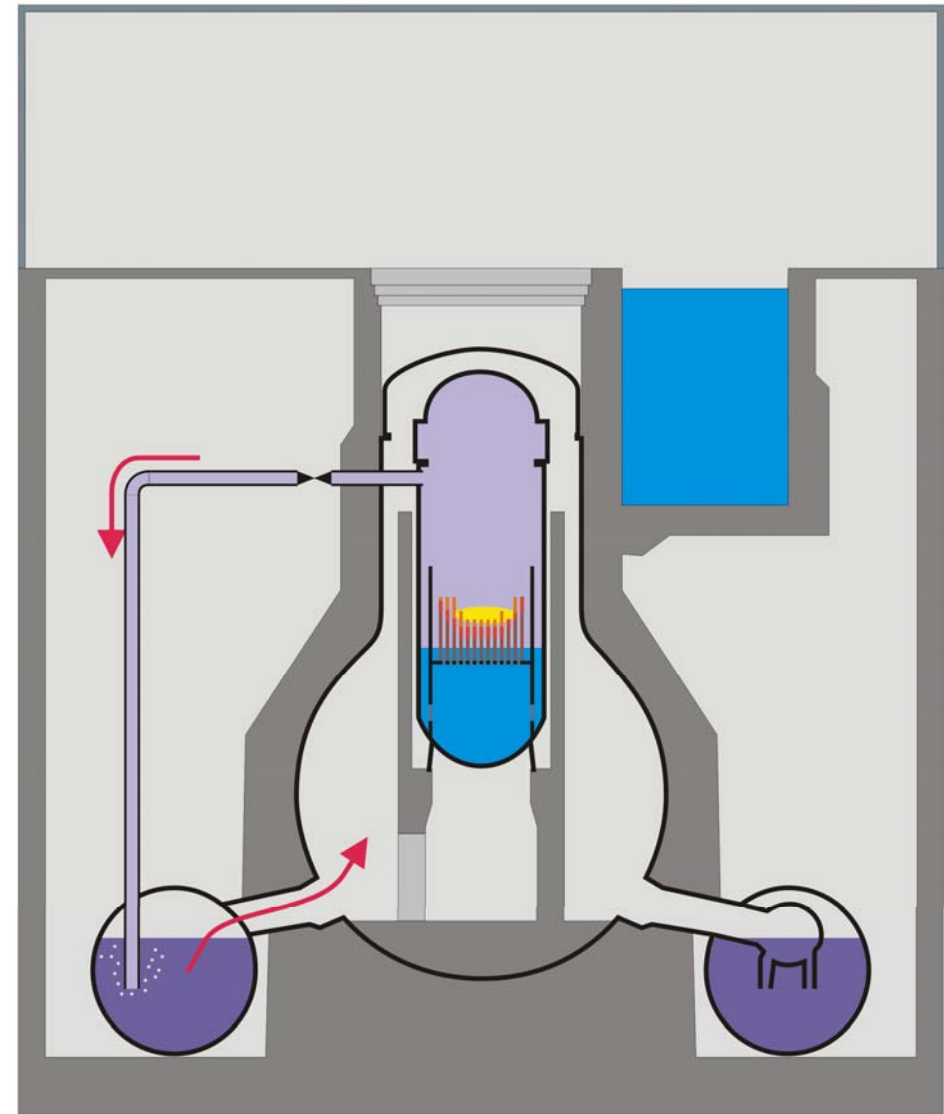
## Geração de Hidrogênio

- A reação zyrcaloy – vapor inicia-se a partir de 870°C
- Sherman calculou o tempo necessário para produzir 100 kg de H<sub>2</sub> em função da temperatura

927°C	4 h
1104°C	21 min
1327°C	216 s
1527°C	52 s

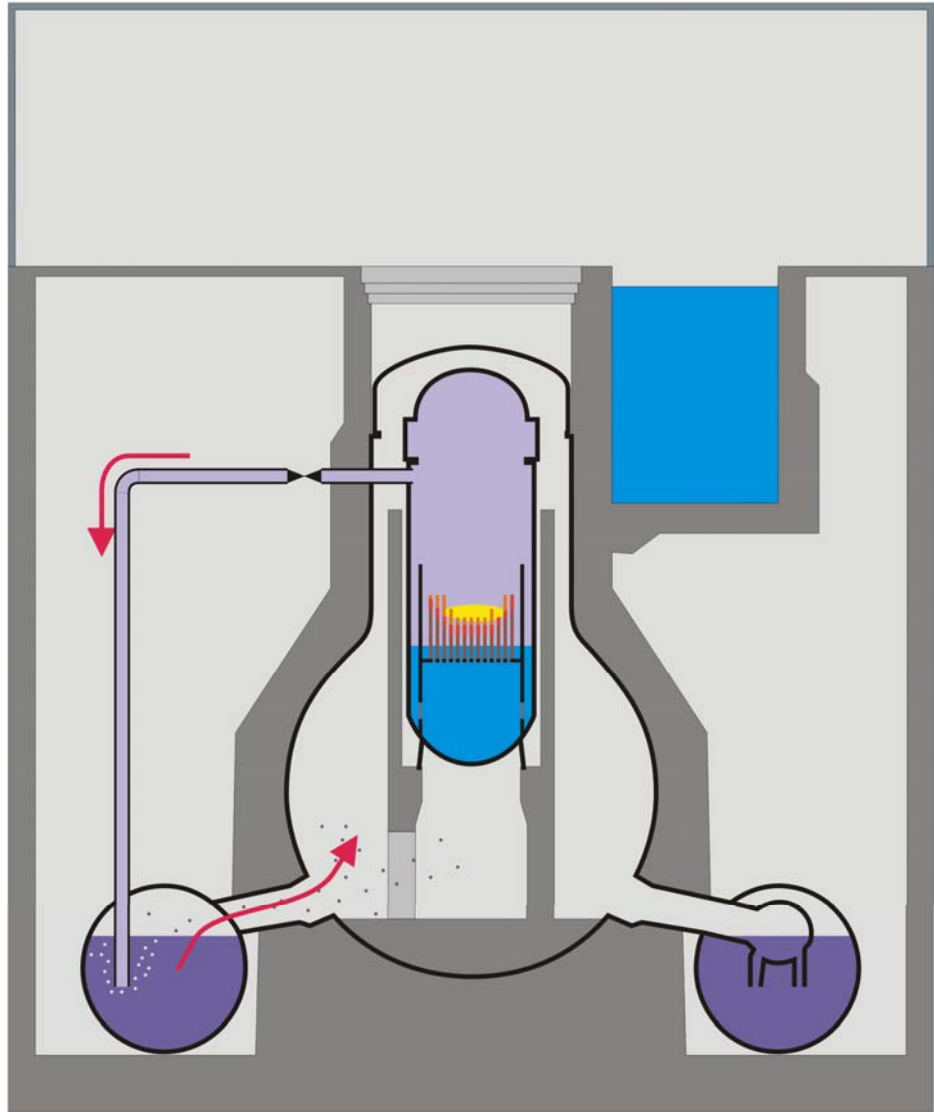
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- ~1800°C (Un. 1,2,3)
  - Derretimento do cladding e das estruturas de aço
- ~2500°C (Un. 1,2)
  - Quebra de E.C., debris no núcleo
- ~2700°C (Un. 1)
  - Derretimento de pastilhas
- Restauração de suprimento de água impediu a progressão, após longo tempo sem água, Un. 1 (27h), Un 2 (7h), Un 3 (7h)



## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

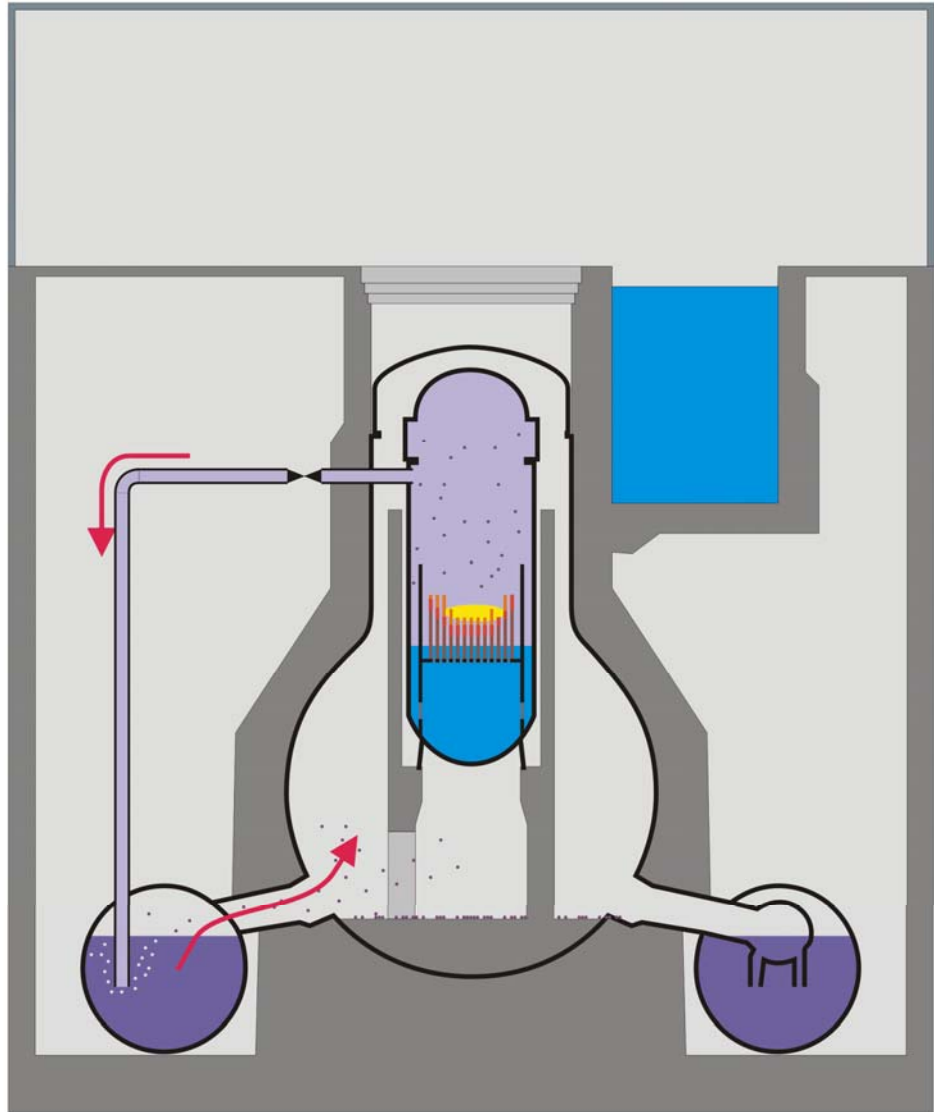
- Liberação de produtos de fissão
  - Xenônio, Césio, Iodo,...
  - Urânio/Plutônio (Un 3 – MOX)
- Descargas na câmara de condensação, retenção parcial
- Xenônio e outros aerossóis entraram pela contenção seca





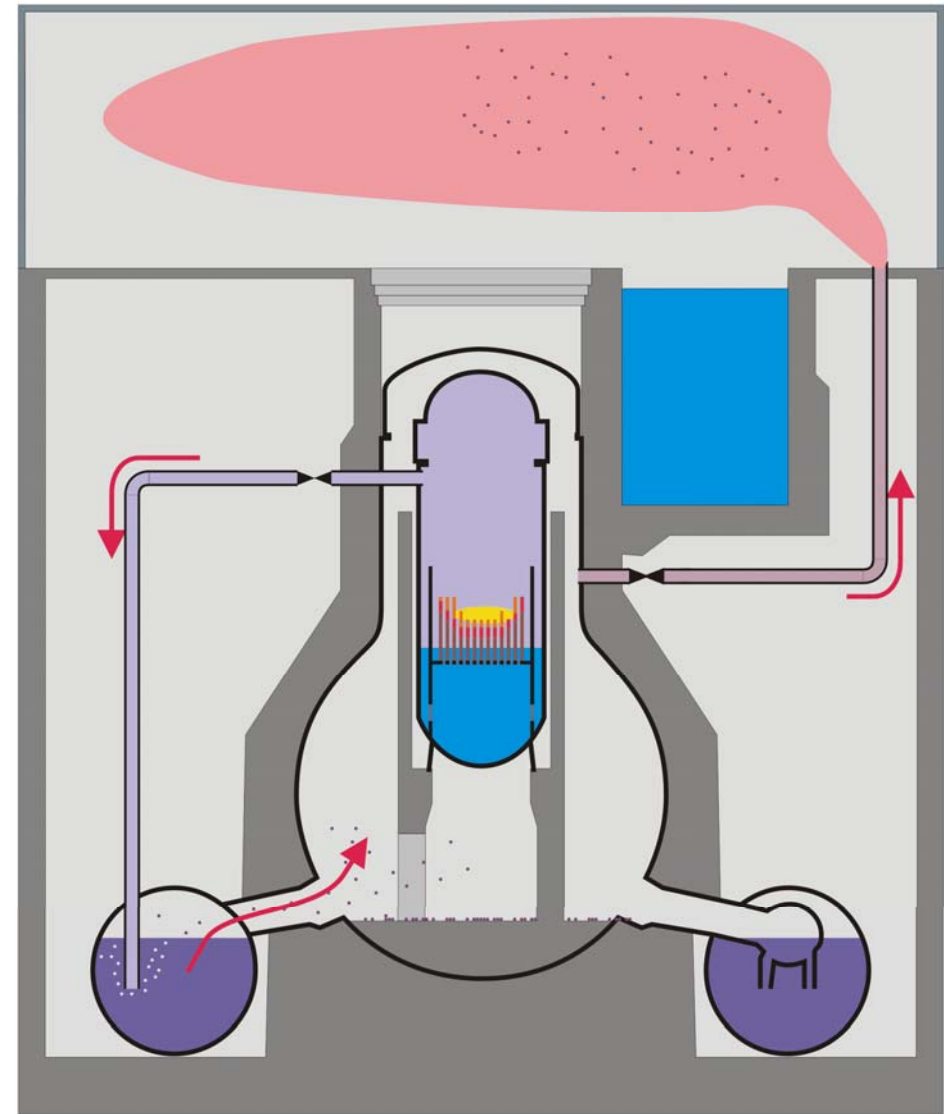
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- Contenção, última barreira entre os produtos de fissão e o meio ambiente, possui uma parede de 3cm e pressão de projeto de 4-5bar
- A pressão ultrapassou 8 bars
  - Gases inertes + H<sub>2</sub> da oxidação do núcleo + ebulição da água na câmara de condensação



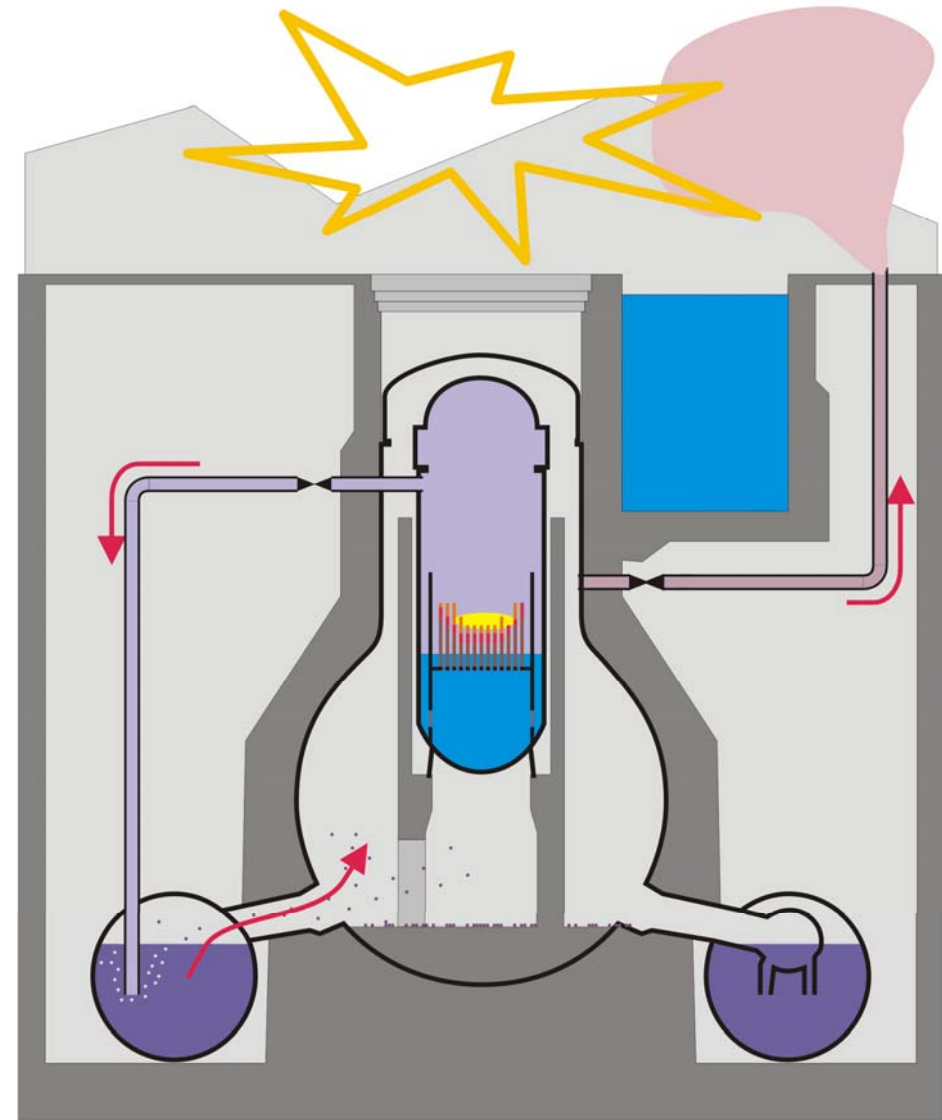
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- Aspectos positivos e negativos da depressurização:
  - Remoção de energia;
  - Redução de pressão para ~4 bar
  - Liberação de pequenas quantidades de Aerosóis (Iodo, Césio ~0.1%)
  - Liberação de todos os gases nobres
  - Liberação de hidrogênio
- Gases liberados para o piso de serviço
  - Hidrogênio é altamente inflamável



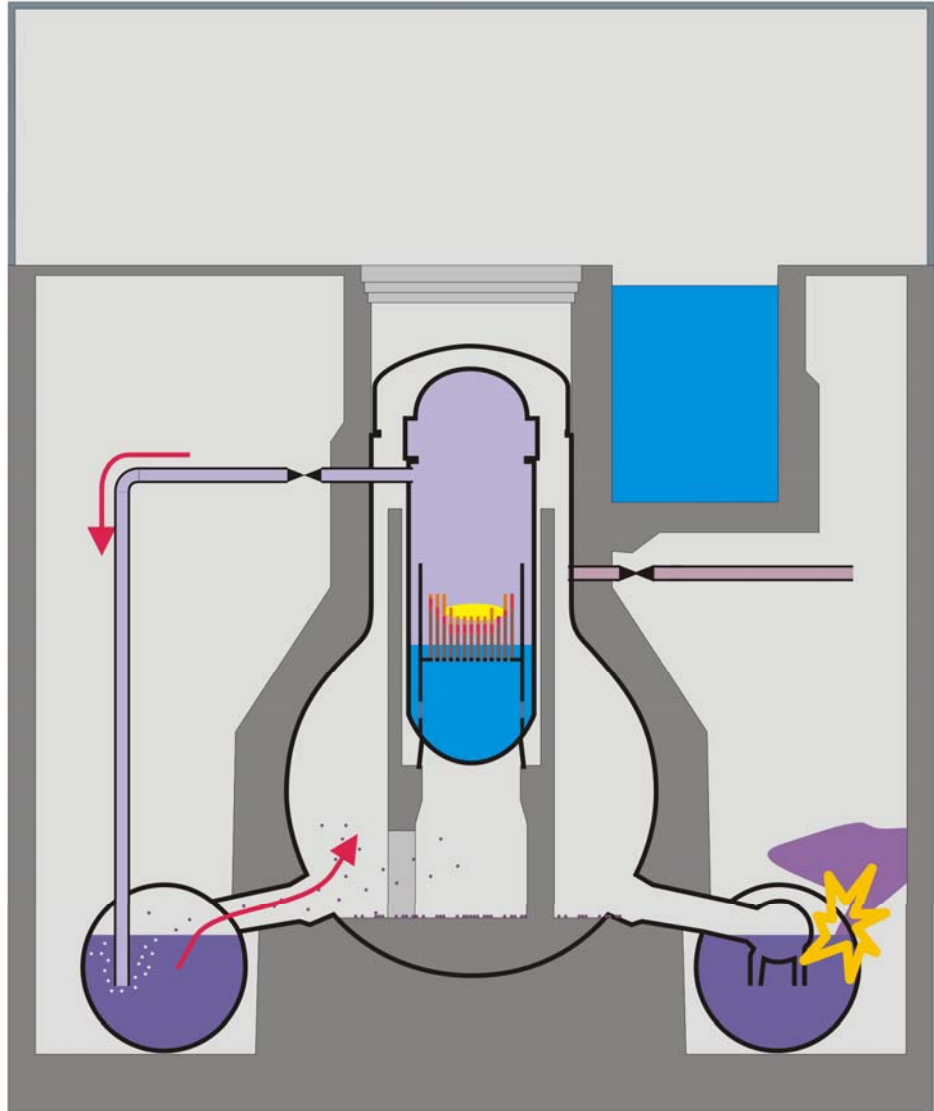
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

- Unidades 1 e 3
  - Explosão provocada pelo H<sub>2</sub> no piso de serviço
  - Destruição da estrutura de aço (placas)
  - Aço reforçado do reator resistiu



## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

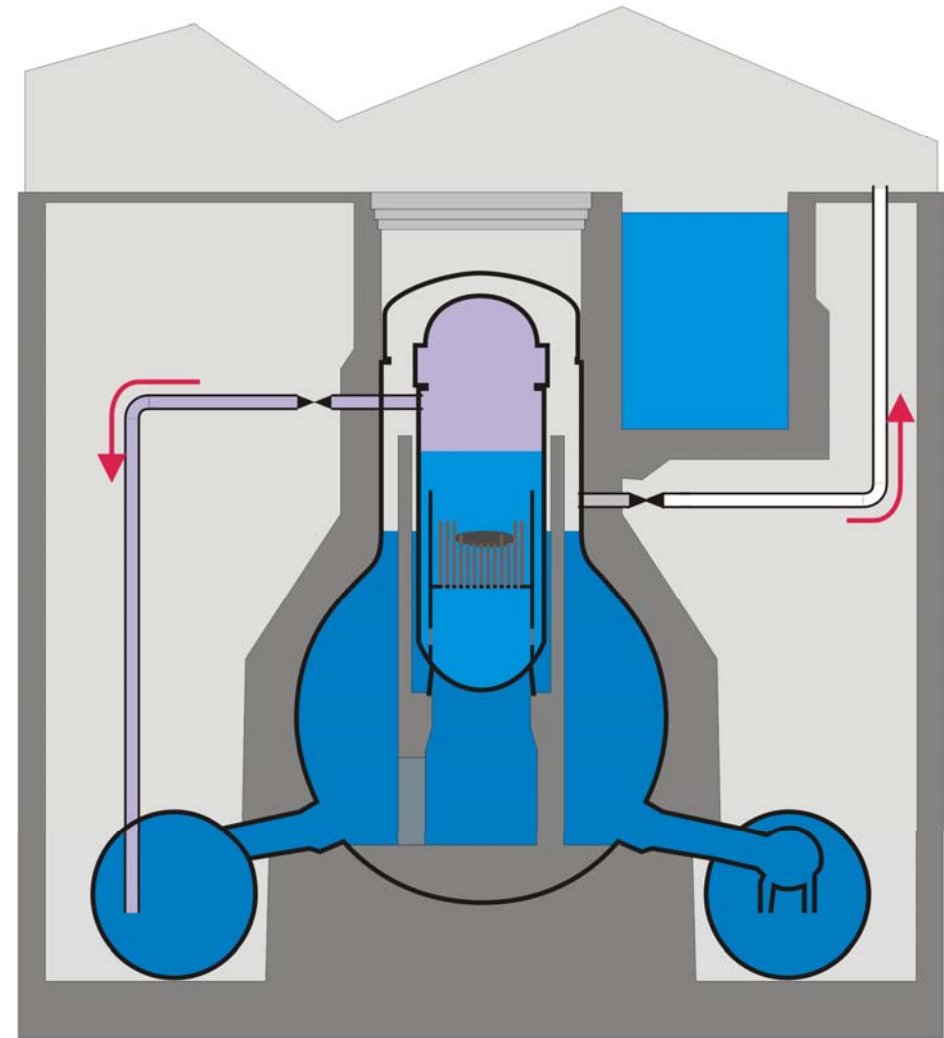
- Unidade 2
  - H<sub>2</sub> causa explosão dentro do prédio do reator
  - Prováveis danos à câmara de condensação (água muito contaminada)
  - Liberação de produtos de fissão
  - Evacuação da planta devido a altas doses
  
- Não se sabe o que ocorreu de diferente nesta Unidade





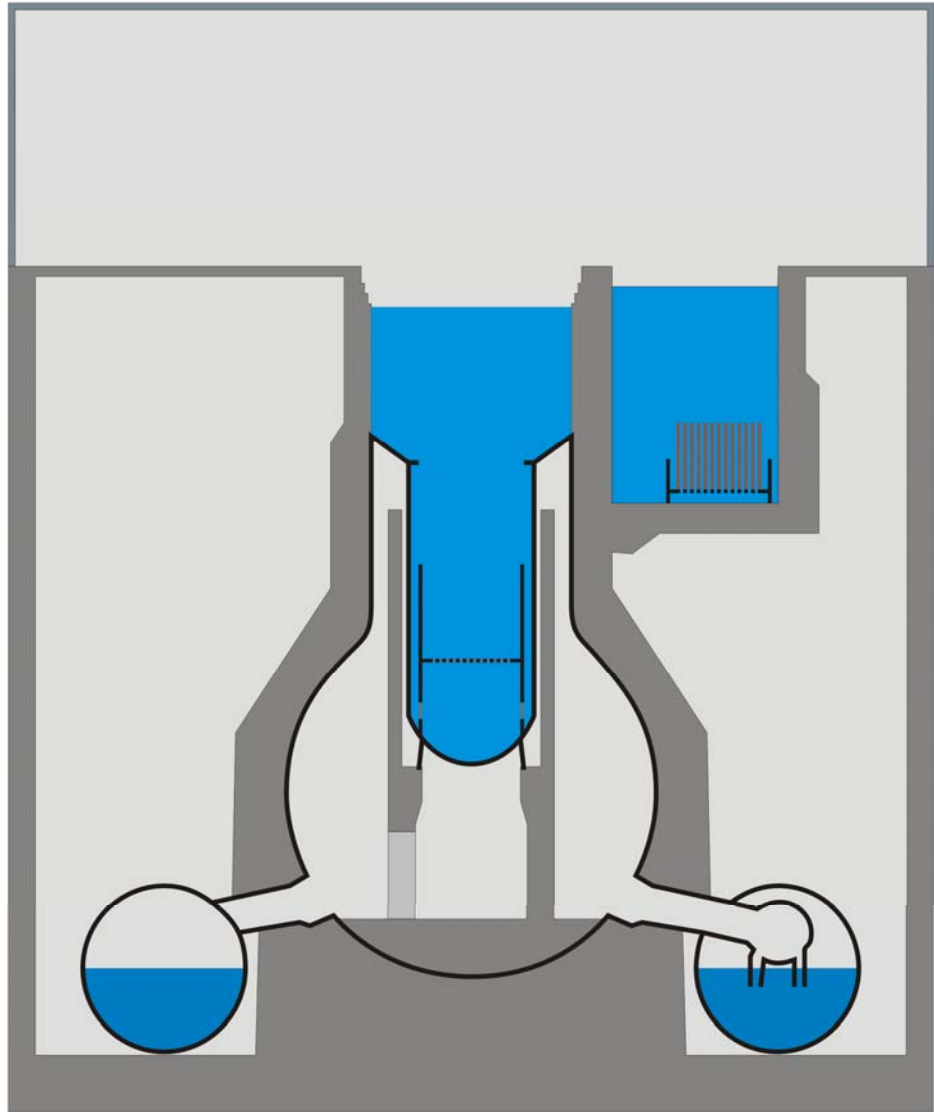
## Fukushima Daiichi – Evolução do Acidente

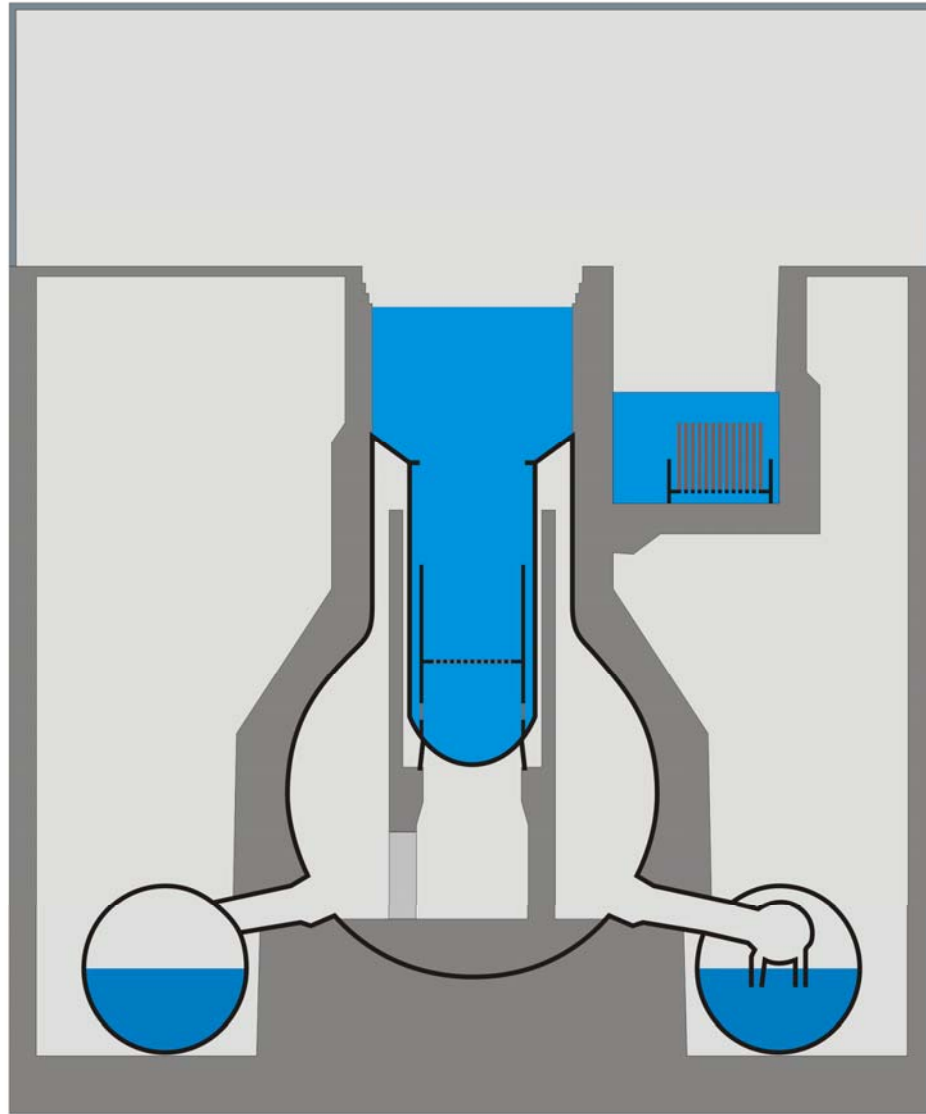
- Injeção de água do mar (helicópteros, utilização de tanque anti-motim e bombas de lançamento de concreto)
- Recuperação de geradores diesel
- Alimentação elétrica externa
- Utilização de água pura
- Inundação do reator
- Diminuição de emissão (?)

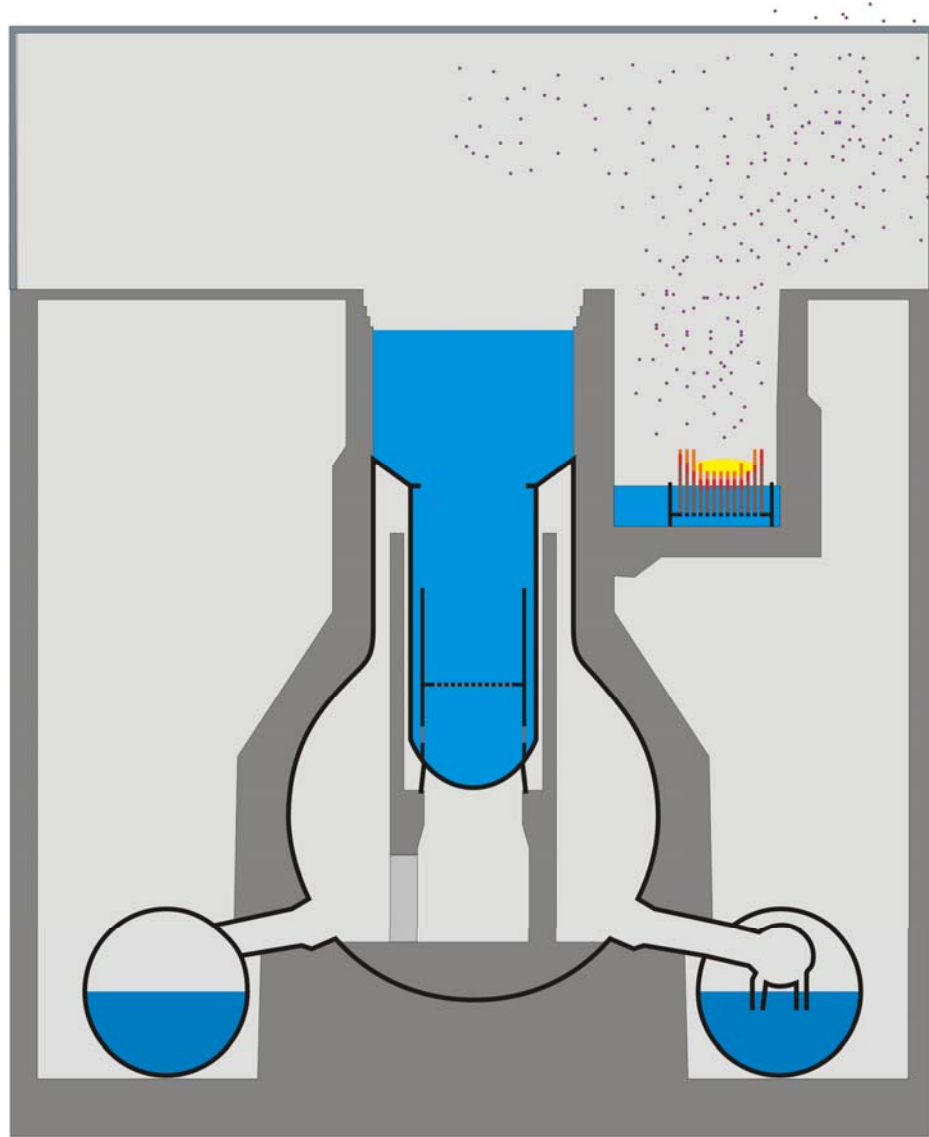


## Piscina de combustível irradiado

- Parada para troca na Unidade 4: todo o núcleo na piscina;
- Investigação: houve vazamento devido ao terremoto?
- Consequências
  - Derretimento de E.C.
  - Liberação

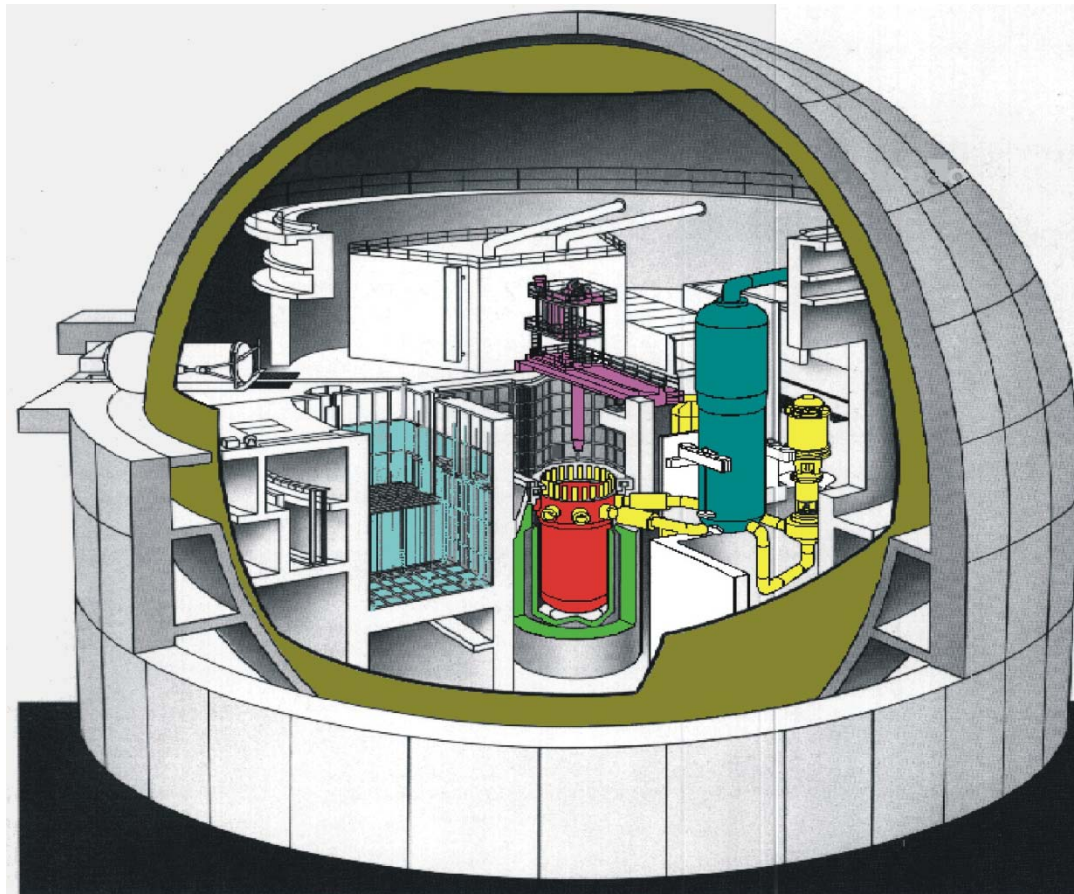




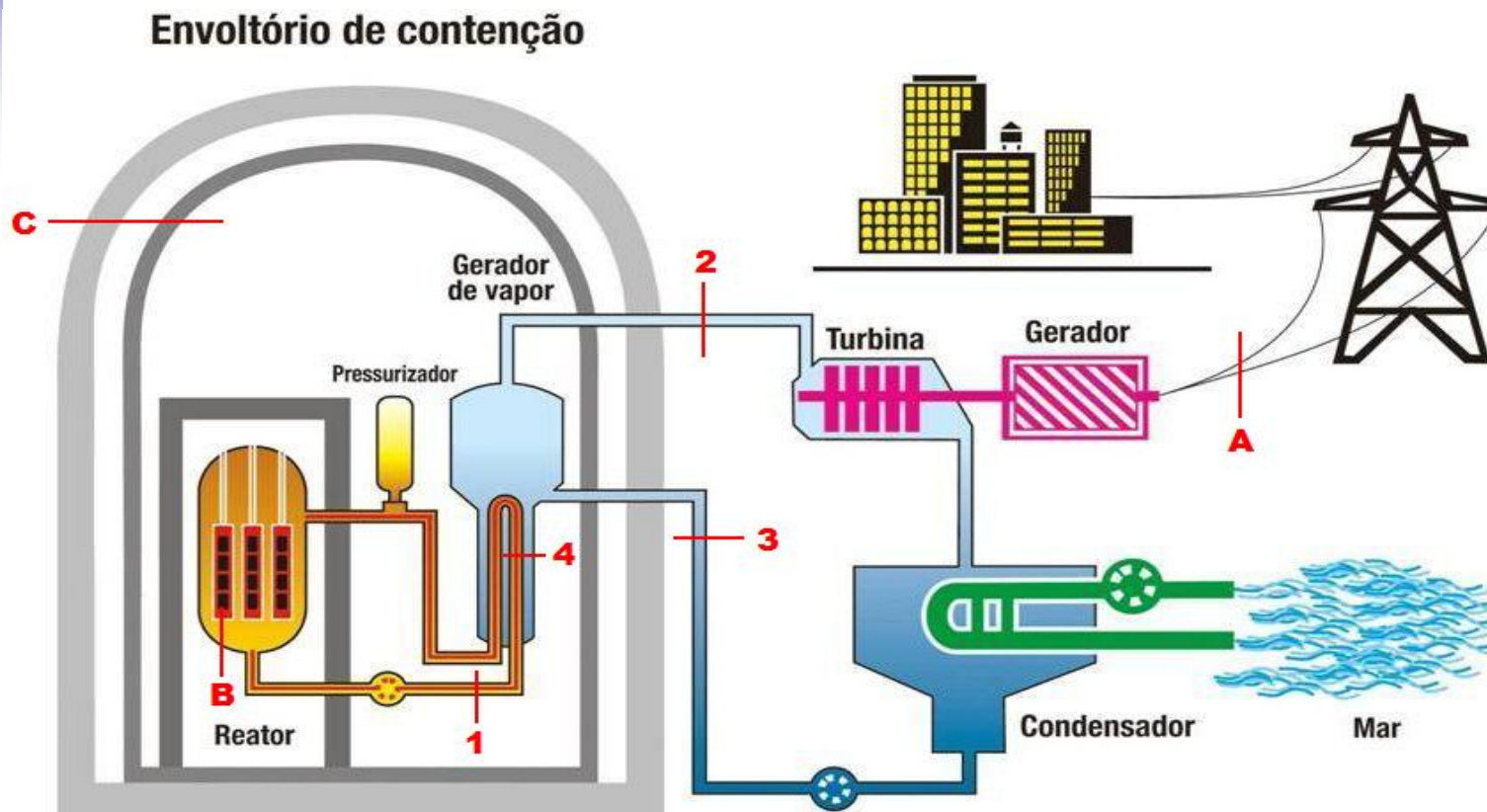




## Usinas PWR - Angra



## Reatores PWR – Acidentes Base de Projeto



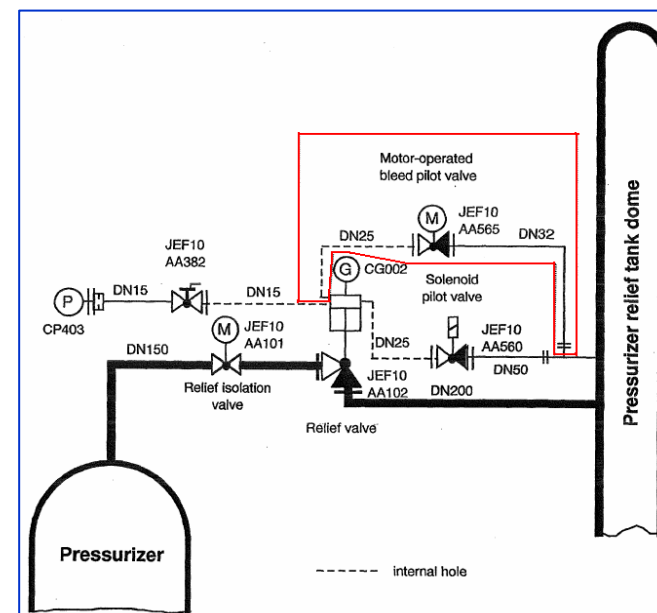
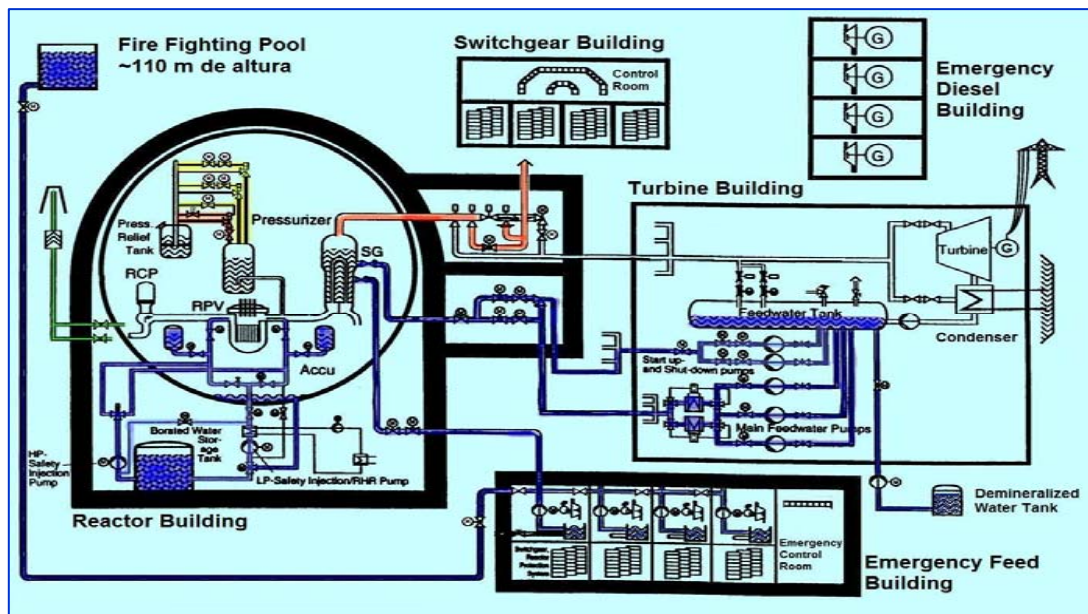
EXEMPLOS DE ACIDENTES COM RUPTURA DE:	1	Tubulação de Refrigeração do Reator
	2	Tubulação de Vapor
	3	Tubulação de Água de Alimentação
	4	Tubo do Gerador de Vapor

Condições postuladas:  
 A - Falha da Alimentação Elétrica Externa  
 B - Falha de Elemento Combustível  
 C - Vazamento da Contenção

Demonstração da capacidade de desligamento seguro da unidade mesmo em condições de determinadas configurações de falhas de equipamentos de segurança (probabilidade de fusão do núcleo  $\sim 5 \times 10^{-6}$  / reator.ano).

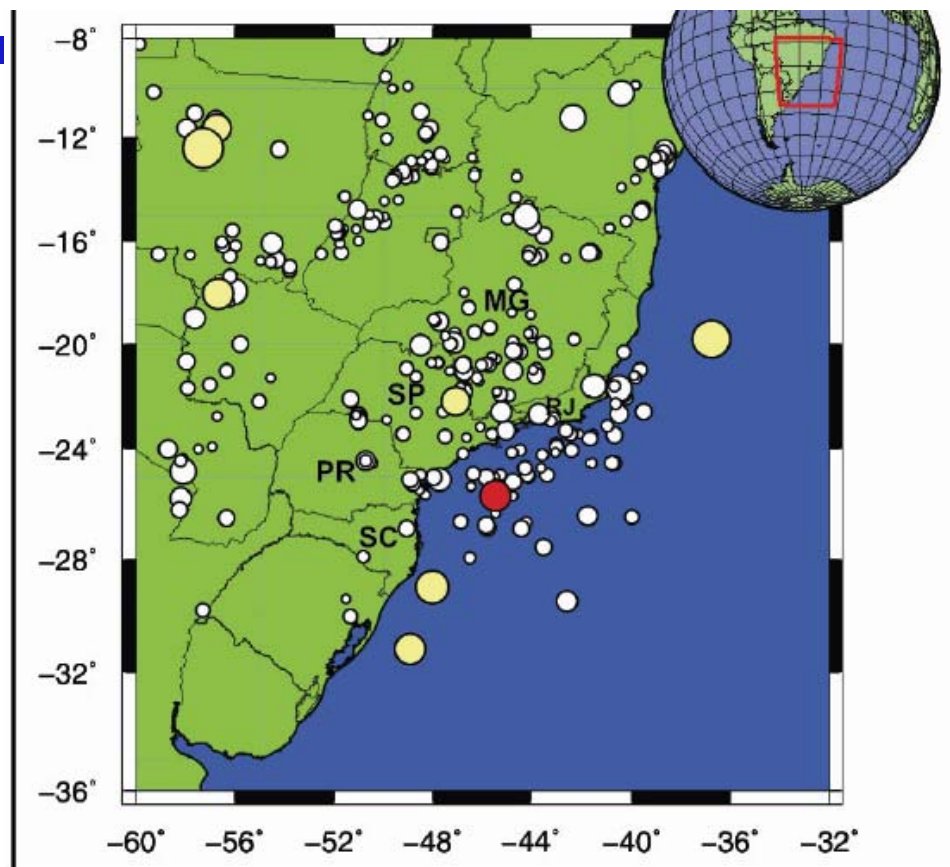
# Reatores PWR – Acidentes Além da Base de Projeto

- combinações de acidentes e/ou falhas múltiplas de sistemas de segurança;
- ação baseada na preservação de “funções críticas de segurança”;
- implementação em Angra 1 e Angra 2, de acordo com normas e padrões internacionais;
- redução da probabilidade de fusão do núcleo e mitigação das conseqüências de acidentes severos





## Consideração de Terremotos e de Movimentos de Mar no Projeto das Usinas de Angra



Projeto toma por base os registros históricos de ocorrência de sismos (área de interesse ~300km em torno da instalação)

### Principais terremotos

- 1922 - Pinhal, SP, 5.1  $m_b$
- 1939 - Tubarão, SC, 5.5  $m_b$
- 1955 - Serra Tombador, MT, 6.6  $m_b$
- 1955 - Alto Vitoria Trindade, 360 km offshore, 6.3  $m_b$
- 1967 - Cunha, SP - 4.1  $m_b$
- 2008 – São Vicente – 5.2  $m_b$

Critério de projeto: maior terremoto ocorrido na área de interesse aplicado ao local da instalação  $\Rightarrow$  0,067g de aceleração na superfície da rocha:

## Usinas de Angra – Projeto para Terremotos

- usinas projetadas para assegurar desligamento seguro do reator em condições de abalo sísmico que produzam acelerações de até 0,1g na superfície da rocha (mínimo aceitável por norma para instalações nucleares);
- relação com escala de potência (escala Richter):

Magnitude (escala Richter)	Distância para Aceleração de 0,10g
4	0
5	12 km
6	37 km
7	90 km

- maior evento registrado no sítio das usinas foi 0,0017g (< 2% da aceleração de projeto)



## Condições para Ocorrência de Tsunamis



### Tsunamis:

- terremotos de magnitude superior a grau 7;
- ocorrência no mar, profundidades inferiores a 100km;
- regiões de borda de placas tectônicas com movimento de sobreposição

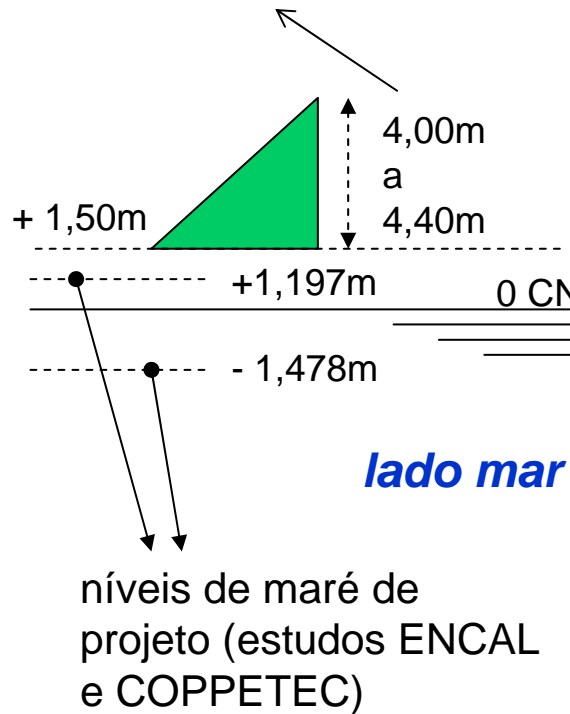
### Excluída a possibilidade de tsunamis no Brasil

- costa brasileira distante de bordas de placas tectônicas;
- placas tectônicas no Atlântico Sul em movimento de afastamento
- sismo potencial máximo no oceano: 7,0

# Proteção contra Movimentos de Mar

*variação das condições ao longo do molhe*

altura máxima de onda para tempo de recorrência de 50 anos



elevação do mar na interação onda-molhe

+ 6,38m a  
+ 8,50m

cota de construção

+ 8,00m a + 8,50m

cota de acesso aos prédios de segurança

+ 5,00m  
+ 5,60m

Angra 2

MOLHE DE PROTEÇÃO

*lado mar*

*lado terra*

projeto do Molhe para contenção de ondas de até 4m

## Ações em Curso na ELETRONUCLEAR para Avaliação das Condições de Projeto das Usinas de Angra frente a Eventos Externos

- verificação de dados sismográficos e oceanográficos de estudos de implantação e operação de plataformas off-shore da Petrobrás;
- implantação de rede de monitoração de ondas;
- estudos de evolução de ondas considerando simulação da ocorrência de ondas de 7m na entrada da baía da Ilha Grande (ondas só registradas em alto-mar);
- estudos de formação de ondas pela incidência de ciclones, simulando sua ocorrência na entrada da baía da Ilha Grande;
- estudos de estabilidade estática e dinâmica do molhe de proteção;
- estudos de inundação do site considerando evento de obstrução de canais e redes de drenagem;
- verificação independente dos resultados de monitoração e critérios de avaliação do movimento das encostas no entrono das usinas.



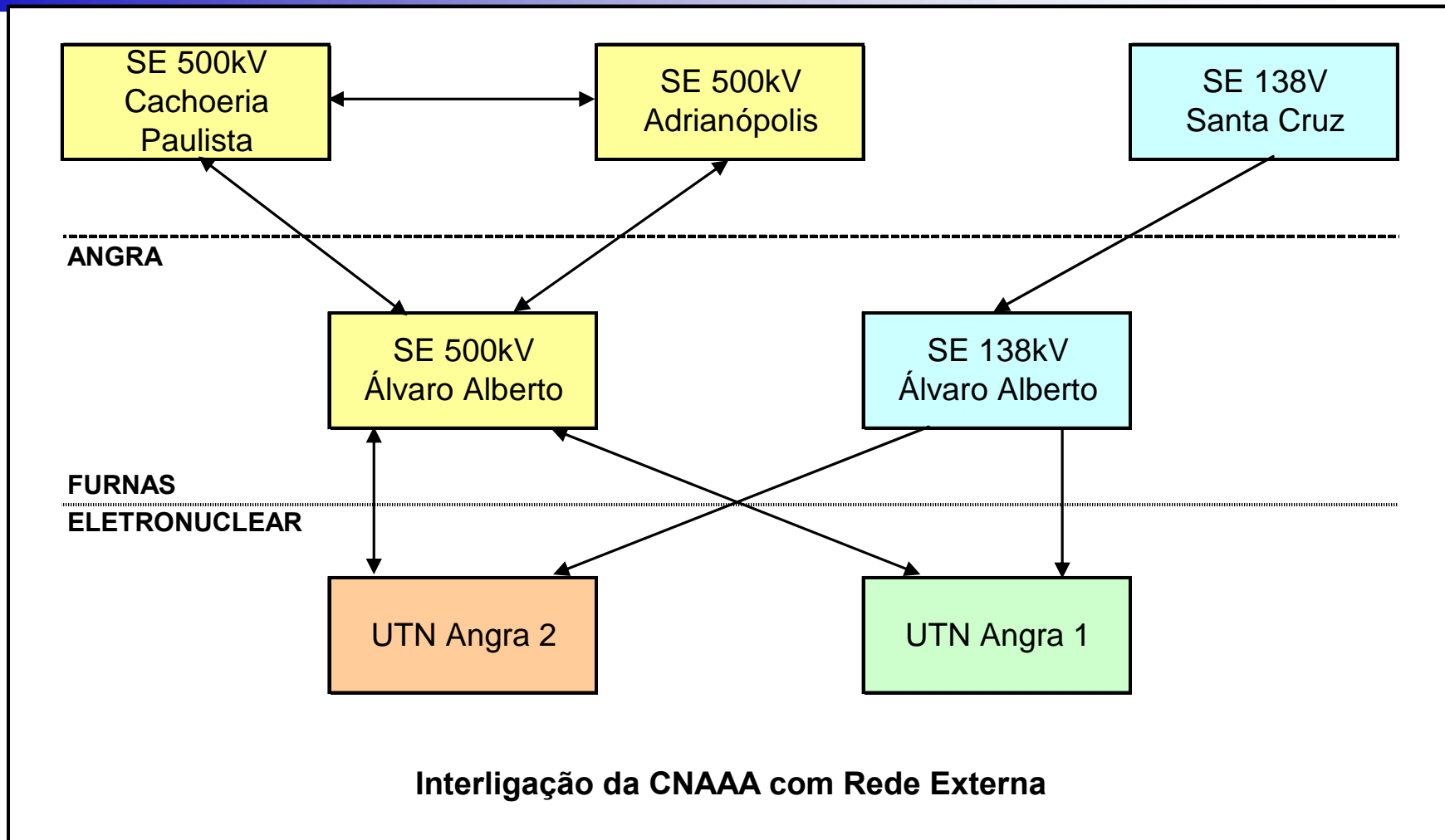
# Usinas de Angra – Proteção Contra Ameaças Geotécnicas (deslizamento de encostas)





# Usinas de Angra

## Suprimento de Energia Elétrica para Auxiliares





# Usinas de Angra

## Suprimento de Energia Elétrica para Auxiliares

<b>FONTE DE SUPRIMENTO</b>	<b>CONDIÇÃO DE SUPRIMENTO</b>	<b>ANGRA 1</b>	<b>ANGRA 2</b>
<b>Filosofia de Redundância</b>		<b>2 X 100%</b>	<b>4 X 50%</b>
<b>Número de Trens de Alimentação</b>		<b>2</b>	<b>4</b>
<b>Fontes de Alimentação Externas (Off-Site Power)</b>	<b>Condição Normal de Operação e Transientes da Rede Elétrica</b>	<b>Gerador da Unidade, Rede Externa de 500kV e Rede Auxiliar de 138kV</b>	<b>Gerador da Unidade, Rede Externa de 500kV e Rede Auxiliar de 138kV</b>
<b>Fontes de Alimentação Internas (On-Site Power)</b>	<b>Acidentes Base de Projeto (Emergency Power Case)</b>	<b>2 Grupos Diesel (um por trem de alimentação)</b>	<b>8 Grupos Diesel (dois por trem de alimentação, alimentando barramentos distintos)</b>
<b>3a Fonte</b>		<b>Acidentes Além da Base de Projeto (Station Black Out)</b>	<b>2 Grupos Diesel (um por trem de alimentação)</b>
<b>4a Fonte (Back-Up para Central)</b>	<b>Alternativa de Alimentação para Melhoria de Condições em Situações de Perda de Alimentação Externa</b>	<b>PCH (em estudo)</b>	

## Dimensionamento da 3ª Fonte (Angra 2 e Angra 3)

- norma alemã KTA exigia originalmente possibilidade de conexão de fonte externa (3ª Fonte) após 72 horas da ocorrência do pior evento externo postulado;
- norma passou a exigir instalação fixa da 3ª Fonte;
- novas exigência de licenciamento nas Europa e Estados Unidos de instalação de 3ª Fonte para fazer frente à perda total das fontes externas e internas;
- 3ª Fonte deverá ser projetada e instalada em condições de operar após a ocorrência do pior evento externo postulado;
- dimensionamento da 3ª Fonte deve considerar as cargas essenciais para desligamento seguro da usina a partir do desligamento do reator;
- capacidade necessária estimada: 5.500kVA;
- solução sendo considerada: Grupo Diesel originalmente fornecido para Angra 3

## Dimensionamento da PCH (CNAAA)

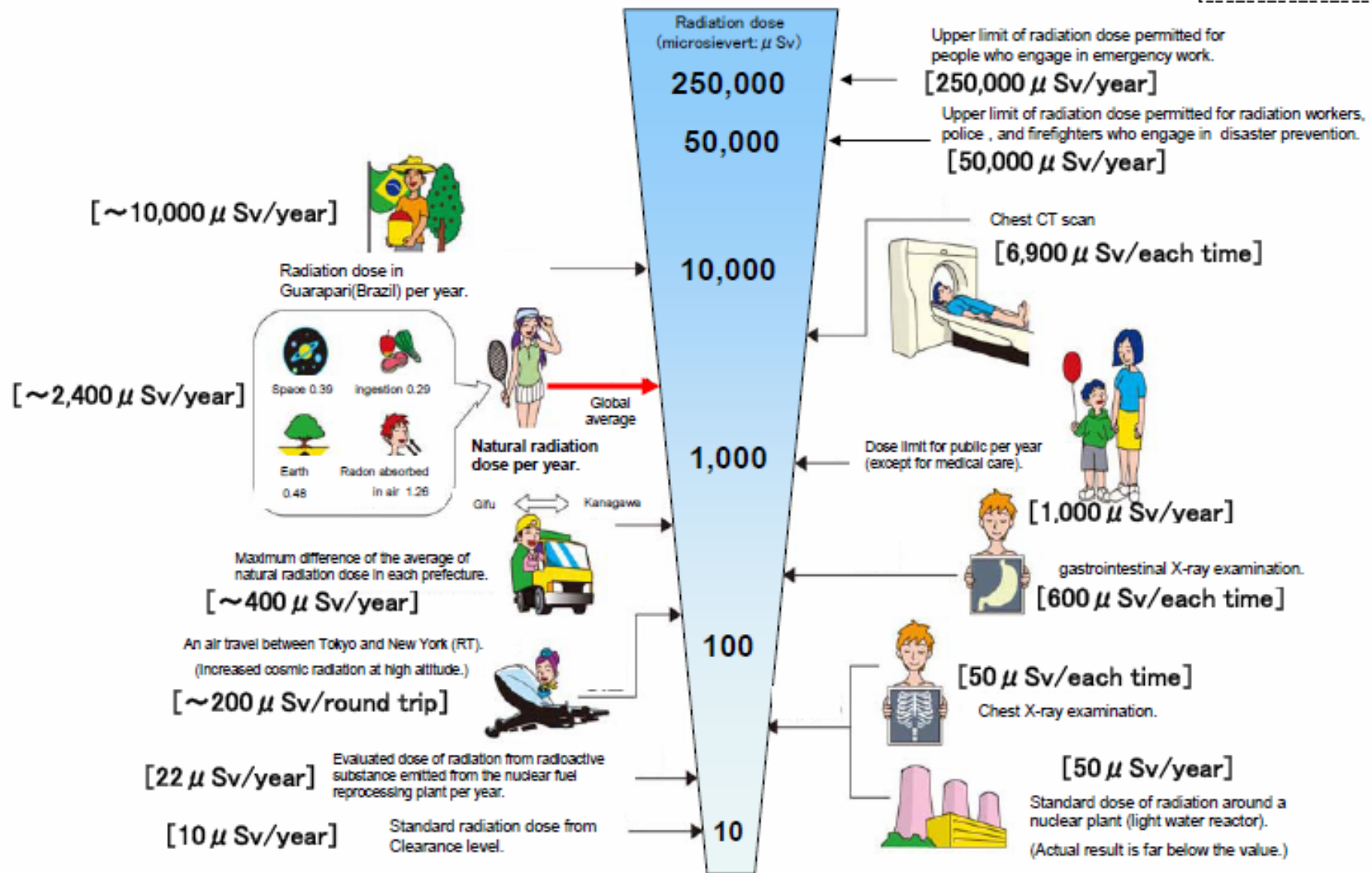
- reduzir vulnerabilidades das usinas a perda total de alimentação externa e falha de grupos diesel de emergência em testes em serviço;
- sem requisitos de operação após terremoto;
- possibilidade de alimentação de pelo menos uma Bomba de Refrigeração do Reator de cada unidade (20MW totais), bombas do Ciclo Água Vapor (7MW totais) e outros consumidores essenciais nas três usinas (1MW);
- considerada a potência mínima de 30MW;
- alternativas em estudo: PCH e Turbina a Gás;
- instalação da PCH nas bacias dos rios Mambucaba ou Bracuhy (estudos da ENERCONSULT em andamento);
- turbina a gás instalada fixa no site.

# Lições de Fukushima

- **Bases de Projetos**
- **Além das Bases – Limites**
- **Desafiar sistemas e procedimentos**
- **Cultura de defesa civil**
- **Foco constante na segurança**

# Radiation in Daily-life

※Unit :  $\mu\text{Sv}$



(Ref) Average dose rate at the monitoring post of Tokyo (3/17 9:00~3/18 9:00, March) :  $0.050 \mu\text{Sv}/\text{h} = 438 \mu\text{Sv}/\text{y}$



