

# El accidente de Fukushima: aspectos técnicos



**Eduardo Gallego Díaz**

Dpto. Ingeniería Nuclear  
Esc. Téc. Sup. Ingenieros Industriales  
Universidad Politécnica de Madrid



SOCIEDAD ESPAÑOLA DE  
PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

**La Protección Radiológica en 2010**

14 de abril de 2011  
Salón de Actos del Ciemat

## El accidente de Fukushima: aspectos técnicos

1. El gran terremoto y tsunami del 11 de marzo de 2011
2. Diseño de los reactores
3. Progresión del accidente
4. Deterioro de las piscinas de enfriamiento
5. Situación actual
6. Principales referencias



RODRIGO SILVA - ANTONIO ALONSO 11-03-2011 / elpais.com



# El gran terremoto y tsunami del 11 de marzo de 2011: réplicas y víctimas

ANTONIO ALONSO 12-04-2011



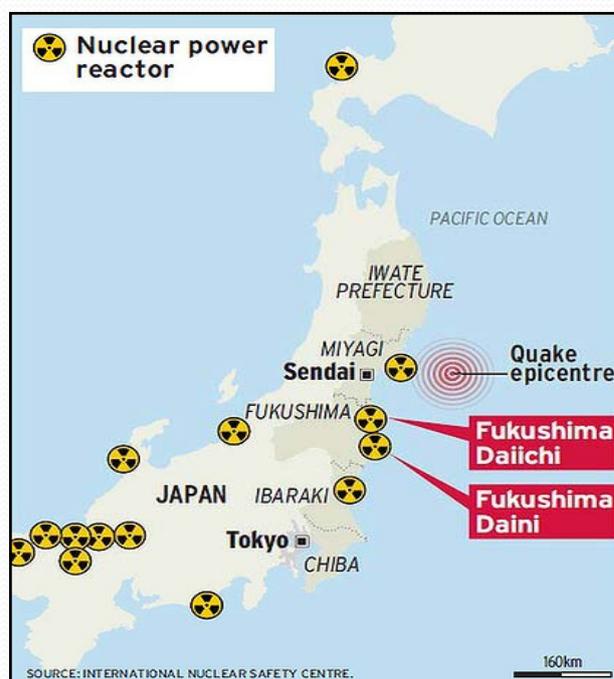
## TERREMOTOS MÁS IMPORTANTES POR MAGNITUD

Adaptada de César Queral, UPM

Fecha	M	País	Muertes
1960	9,5	Chile	5.700 a 10.000
1964	9,2	Alaska	128
2004	9,1	Indonesia	229.866
<b>2011</b>	<b>9,0</b>	<b>Japón</b>	<b>13.127 fallecidos. 14.348 desaparecidos. 4.793 heridos (12-04-2011)</b>
1952	9,0	Unión Soviética	¿?
2010	8,8	Chile	524
1880	8,8	Chile	25
1906	8,8	Ecuador	1.000
1833	8,8-9,2	Indias Orientales Neerlandesas (Indonesia)	
1700	8,7-9,2	Canadá y Estados Unidos	¿?
1965	8,7	Estados Unidos	
<b>1755</b>	<b>8,7</b>	<b>Portugal</b>	<b>70.000 a 100.000</b>

## REACTORES NUCLEARES EN JAPÓN

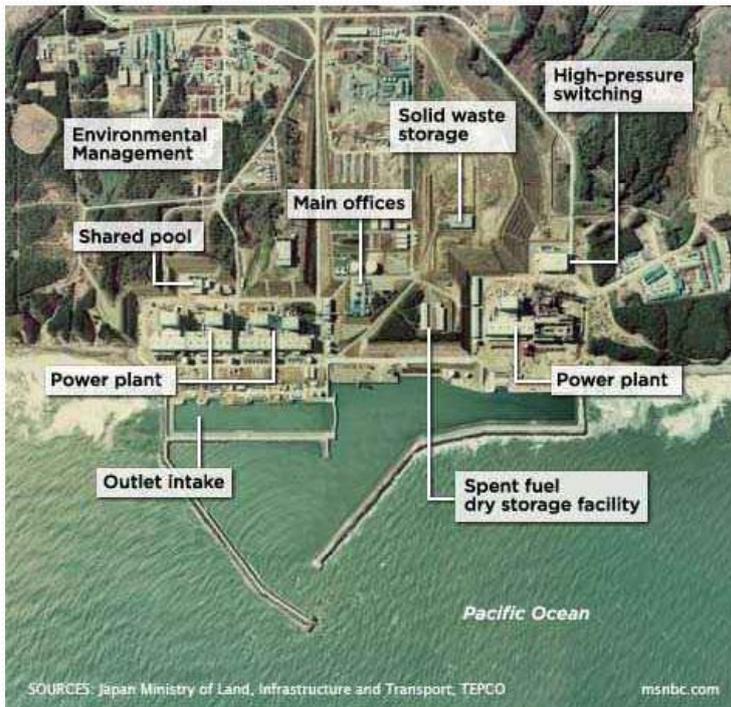
- El epicentro del terremoto se ubicó cerca de las centrales nucleares de Miyagi y Fukushima.
- Todas las plantas pararon de manera automática.



Adaptada de César Queral, UPM

# CENTRAL NUCLEAR DE FUKUSHIMA DAI-ICHI

Este emplazamiento tiene seis reactores nucleares BWR



Adaptada de César Queral, UPM

# CENTRAL NUCLEAR DE FUKUSHIMA DAI-ICHI.

## Reactores afectados



Adaptada de César Queral, UPM

# Efectos del tsunami

<http://www.abc.net.au/news/events/japan-quake-2011/beforeafter.htm>

Yuriage in Natori (looking west)

© Google, Digital Globe, GeoEye



9

# Efectos del tsunami

<http://www.abc.net.au/news/events/japan-quake-2011/beforeafter.htm>

Yuriage in Natori (looking west)

© Google, Digital Globe, GeoEye



10

# Efectos del tsunami

<http://www.abc.net.au/news/events/japan-quake-2011/beforeafter.htm>

Fukushima nuclear plant

© Google, Digital Globe, GeoEye



# Efectos del tsunami

<http://www.abc.net.au/news/events/japan-quake-2011/beforeafter.htm>

Fukushima nuclear plant

© Google, Digital Globe, GeoEye



## BWR/3 – BWR/4. Contención MARK I

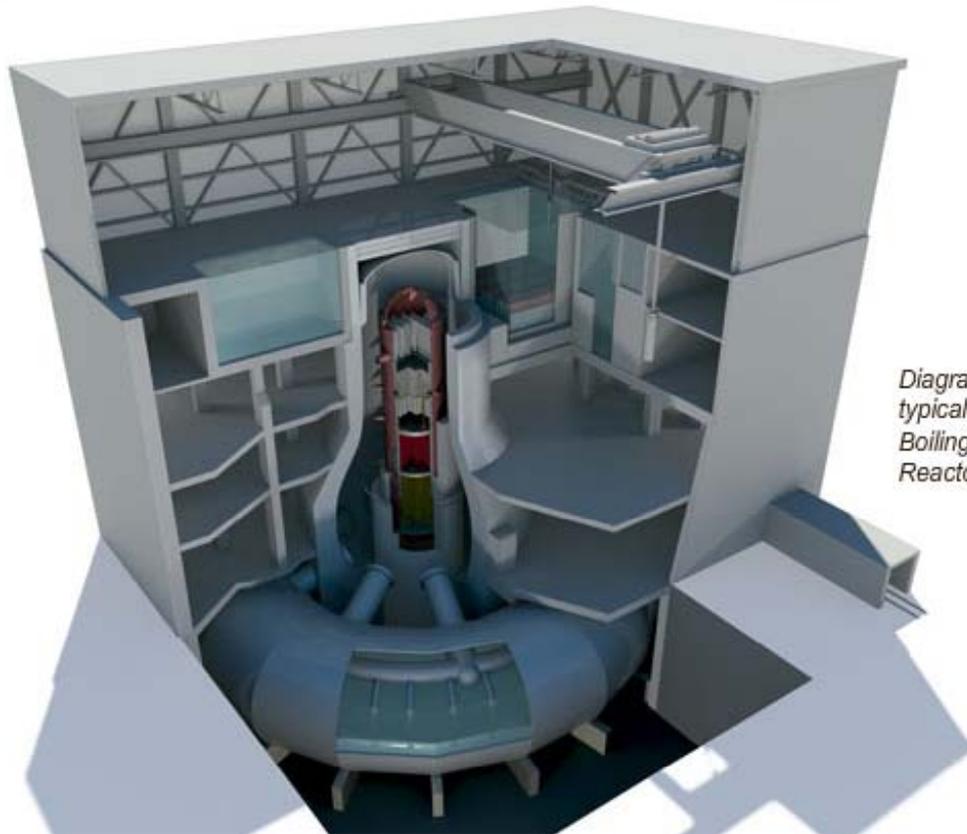
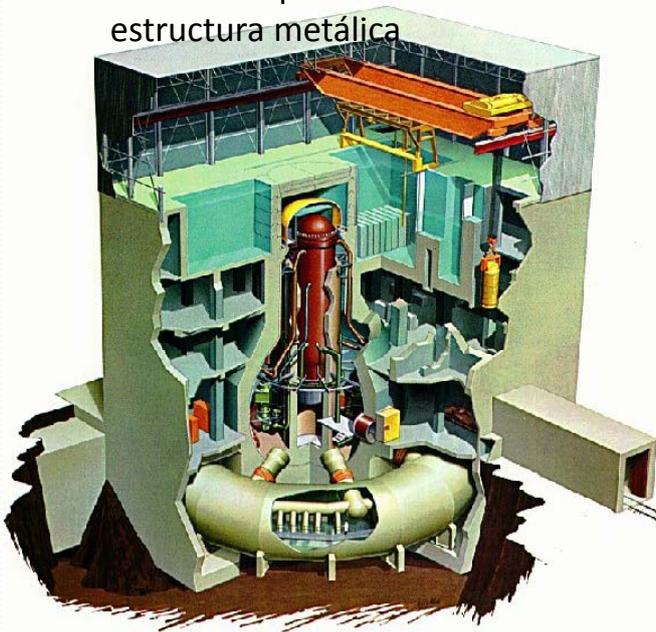


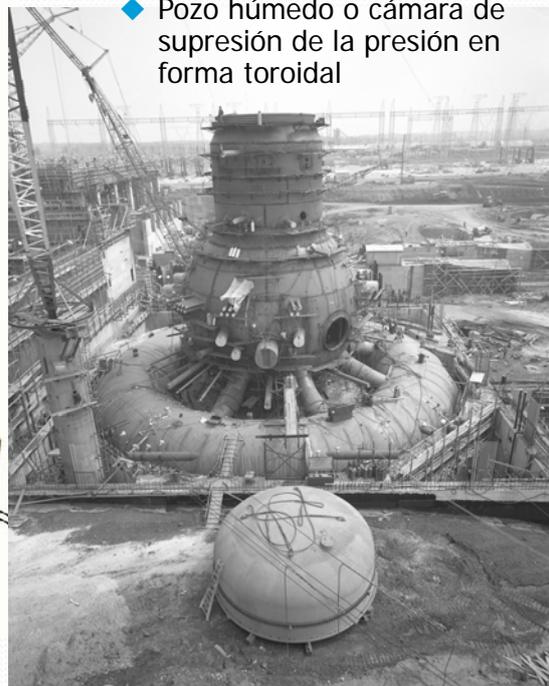
Diagram of a typical Mark I Boiling Water Reactor

## BWR/3 – BWR/4. Contención MARK I

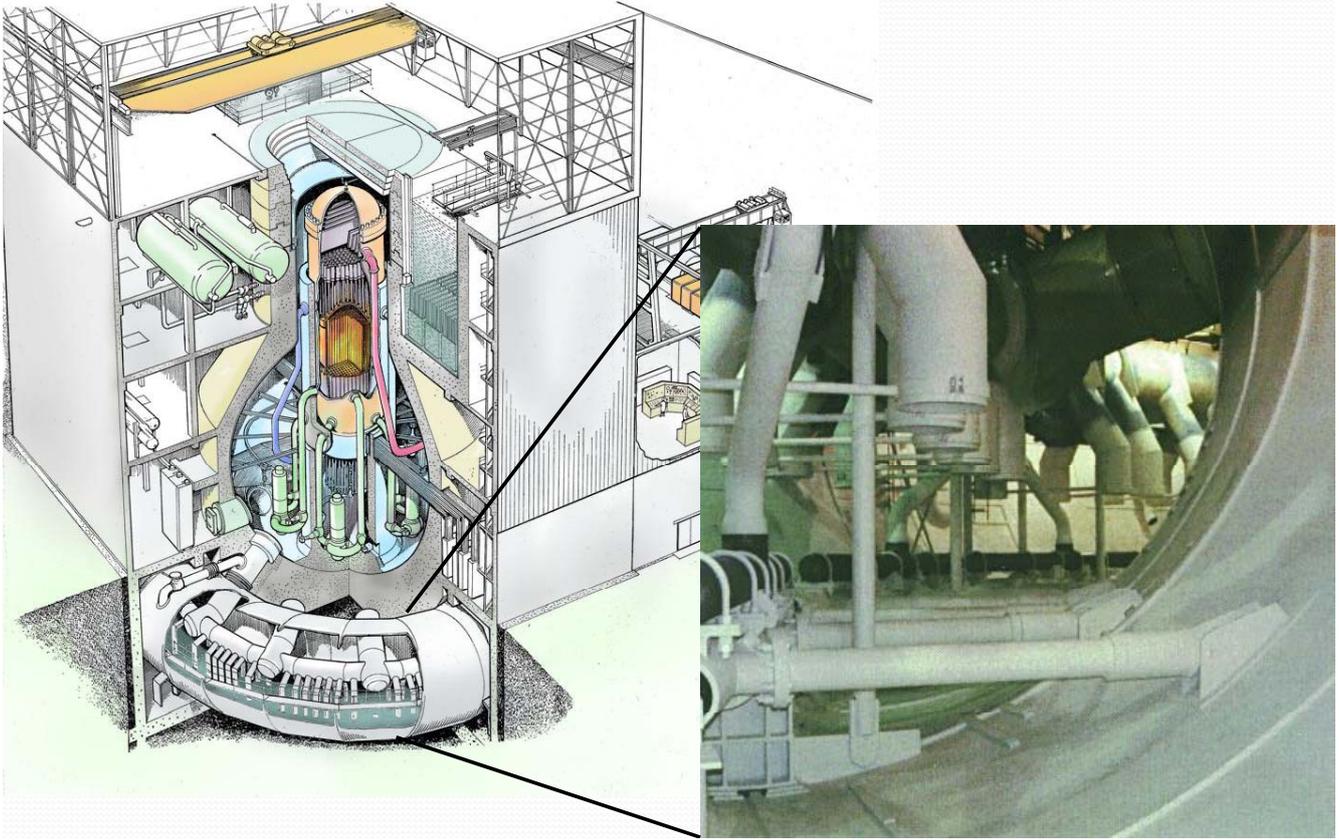
- Estructura del edificio
  - Edificio de hormigón
  - Planta de operación con estructura metálica



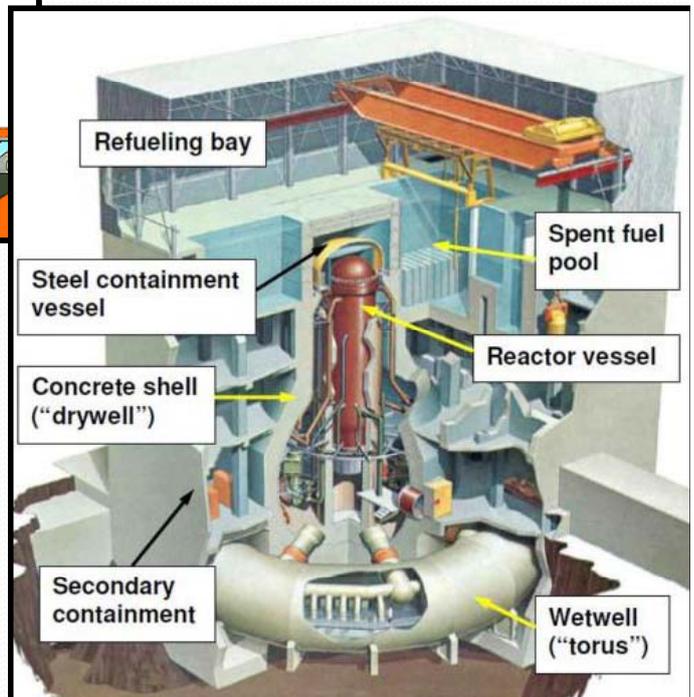
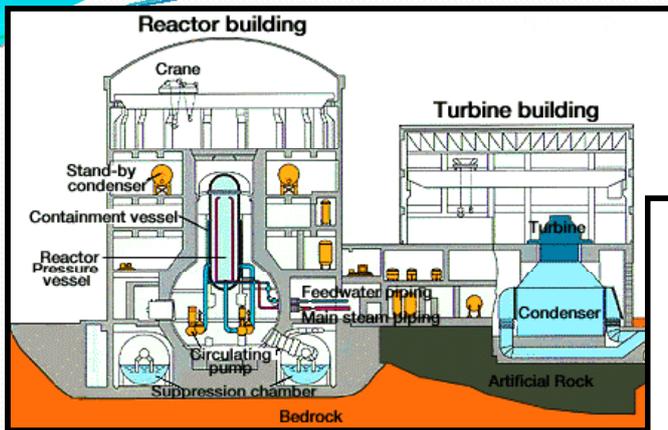
- ▶ Contención:
  - ◆ Pozo seco en forma de bombilla
  - ◆ Pozo húmedo o cámara de supresión de la presión en forma toroidal



# BWR/3 – BWR/4. Contención MARK I



# BWR/3 – BWR/4. Contención MARK I



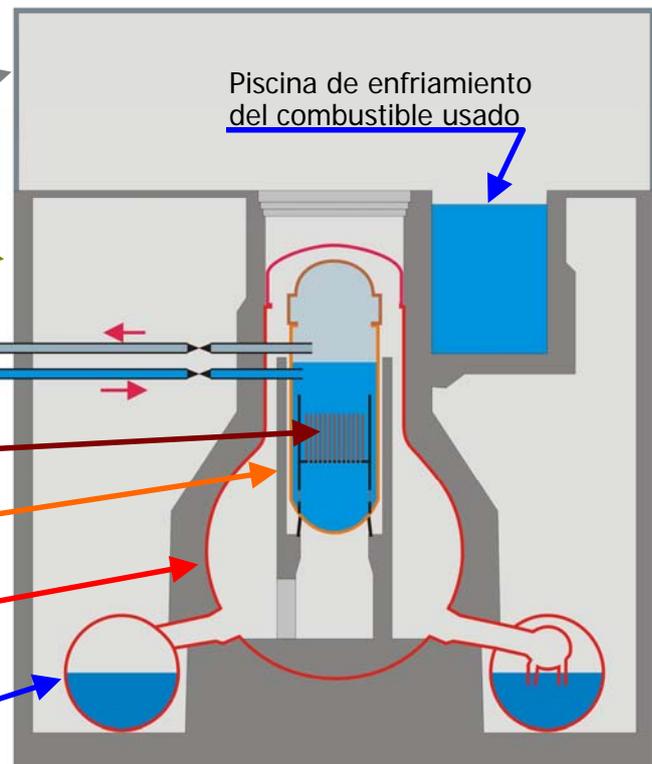
## BWR/3 – BWR/4. Contención MARK I

- ▶ Planta de operación o de servicio



## Diseño del reactor

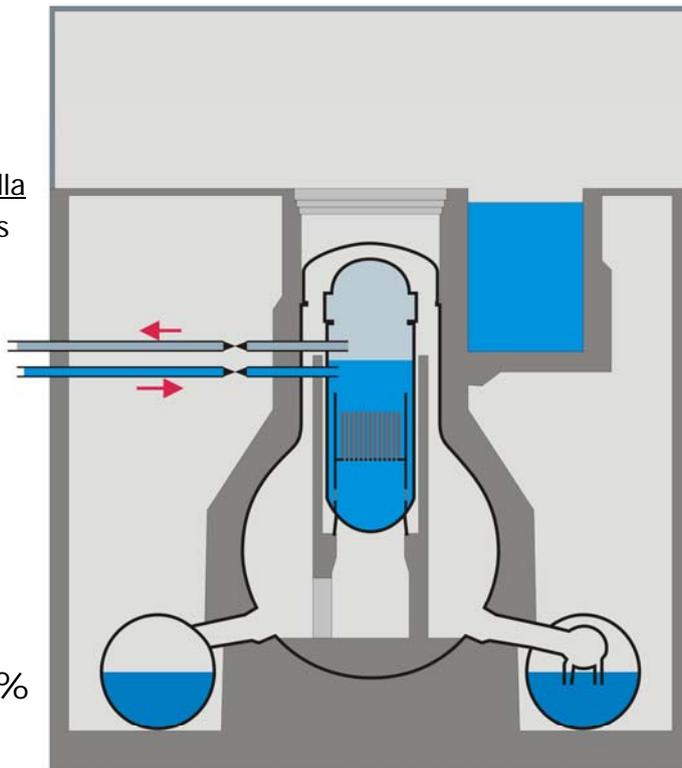
- ▶ Planta de operación (estructura de acero)
- ▶ Edificio de hormigón (contención secundaria)
- ▶ Núcleo del reactor
- ▶ Vasija de presión del Reactor
- ▶ Contención (Pozo seco)
- ▶ Contención (Pozo húmedo) / Piscina de supresión o cámara de condensación



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

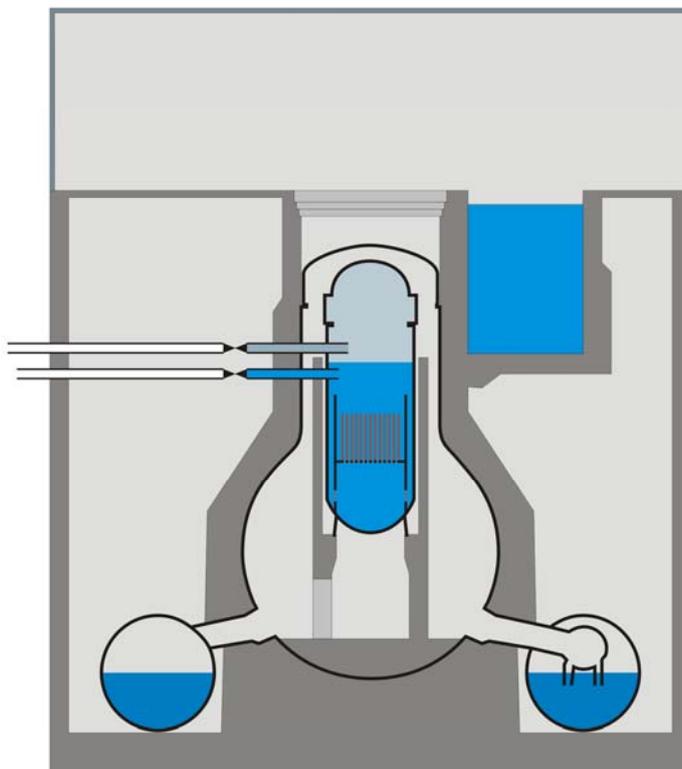
- ▶ 11.3.2011 14:46 - Terremoto
  - ◆ Magnitud 9
  - ◆ Red eléctrica del norte de Japón falla
  - ◆ Los reactores lo superan sin apenas daños
  
- ▶ Disparo del reactor (SCRAM)
  - ◆ La potencia por fisión de uranio se detiene
  - ◆ Generación de calor por desintegración de los productos de fisión acumulados:
    - Tras la parada ~6%
    - Tras 1 día ~1%
    - Después de 5 días ~0.5%



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

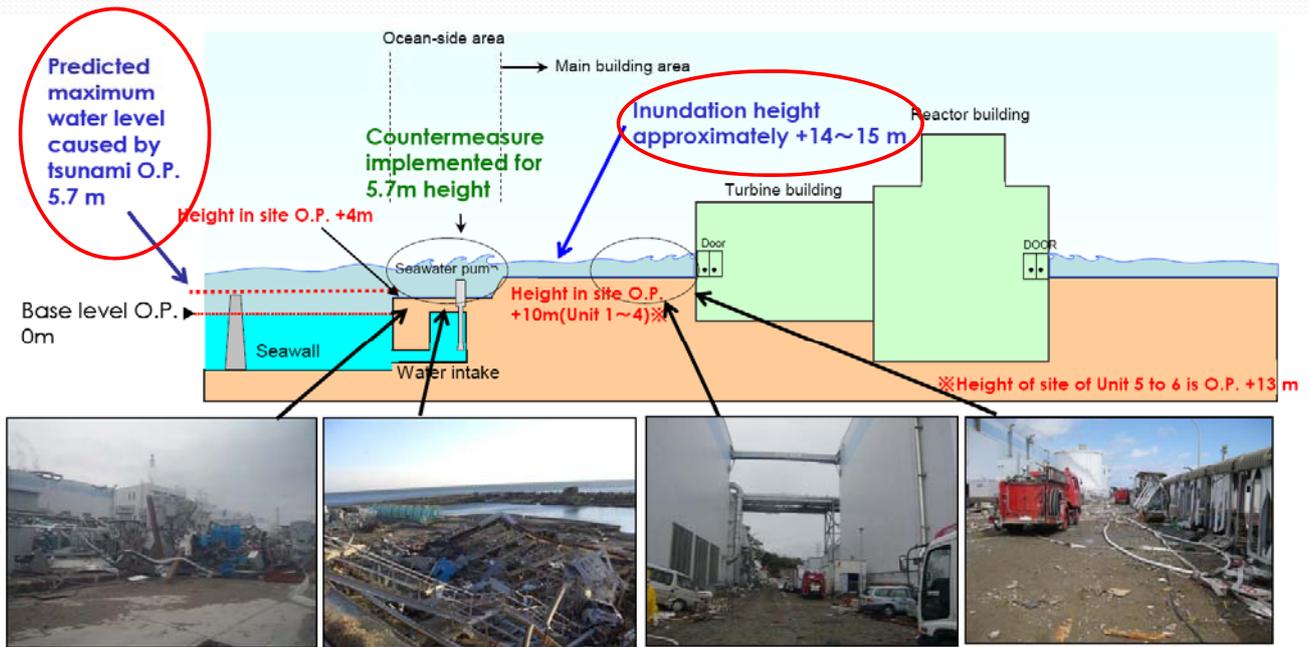
# Progresión del accidente

- ▶ Aislamiento de la contención
  
- ▶ Arranque de los generadores diesel
  - ◆ Alimentación para los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo
  
- ▶ La central está en situación estable y segura



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# El tsunami: causa raíz del accidente

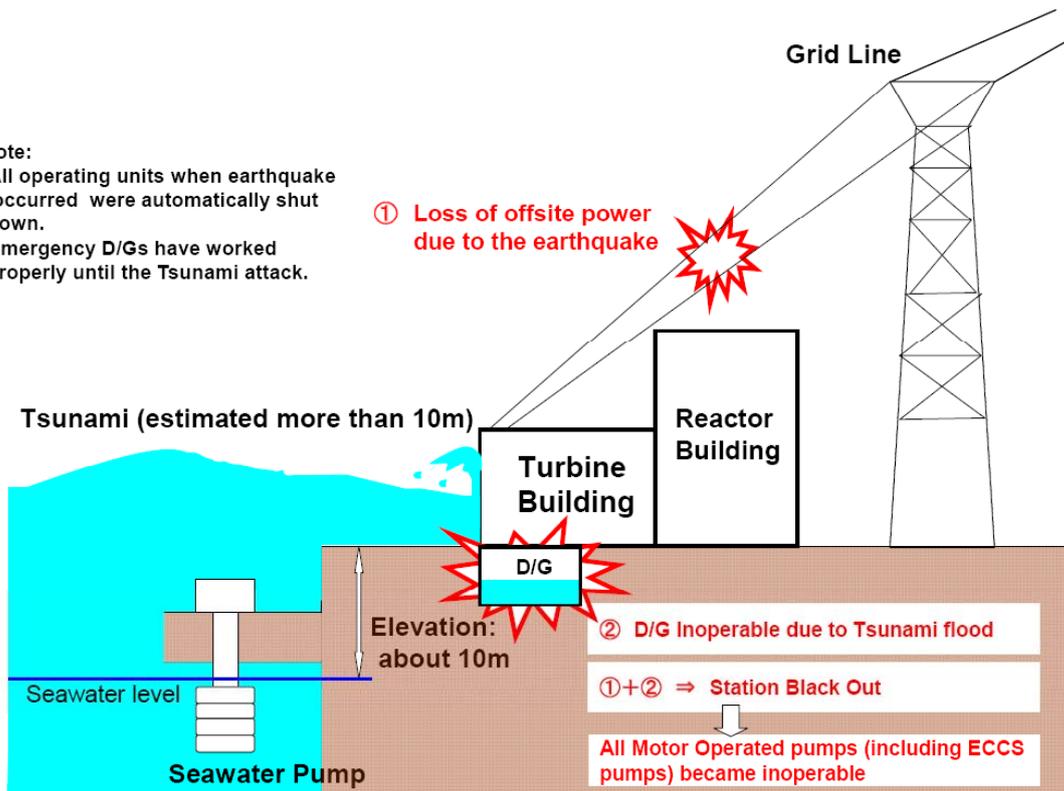


Status of the damages caused by the tsunami at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (conceptual diagram)

Adaptada de TEPCO

# El tsunami: causa raíz del accidente

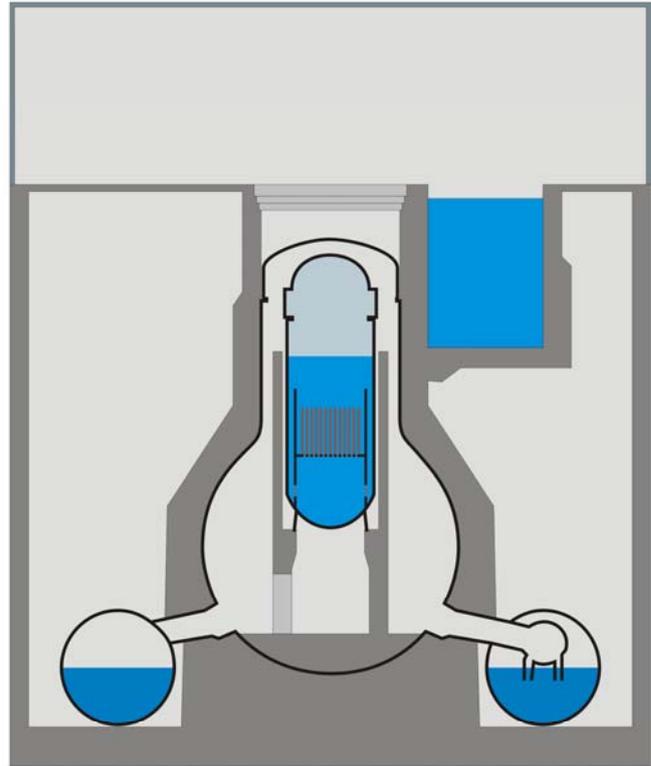
**Note:**  
 -All operating units when earthquake occurred were automatically shut down.  
 -Emergency D/Gs have worked properly until the Tsunami attack.



Adaptada de NISA-METI

# Progresión del accidente

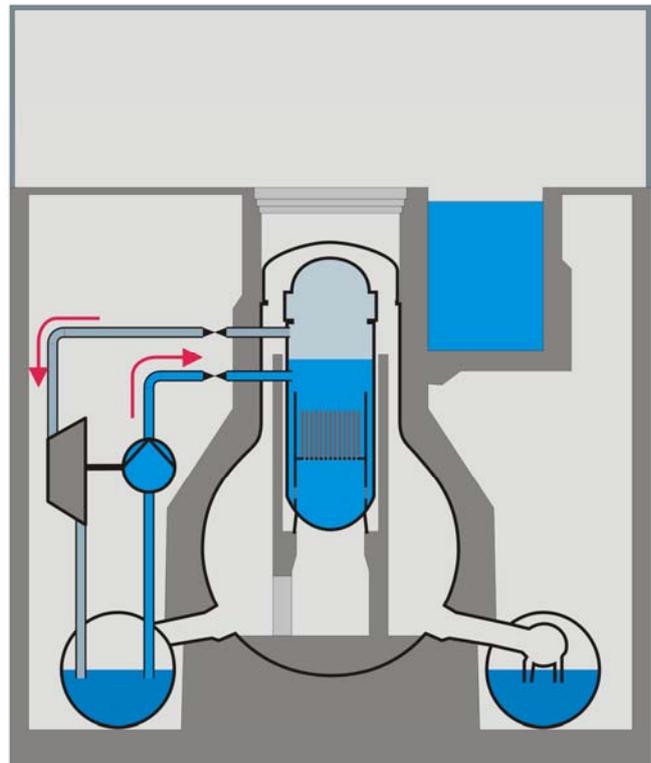
- ▶ 11.3. 15:41 El tsunami golpea la planta
  - ◆ Arrasa los tanques de combustible para los generadores diesel
  - ◆ Se inundan
    - Generadores diesel y/o
    - Edificio de agua de servicios esenciales para refrigerar los generadores
  
- ▶ “Station Blackout” (Apagón total)
  - ◆ Causa común por fallo del suministro eléctrico
  - ◆ Sólo quedan disponibles baterías
  - ◆ Fallan todos salvo uno de los sistemas de refrigeración de emergencia del núcleo



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

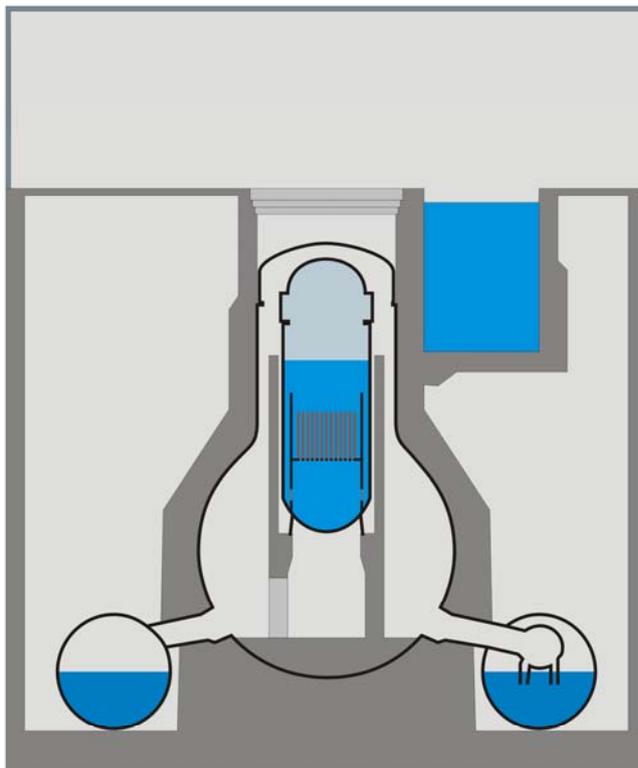
- ▶ El sistema de refrigeración del núcleo aislado (o el condensador de aislamiento) sigue disponible
  - ◆ Utiliza una turbobomba movida por vapor de la propia vasija del reactor
  - ◆ El vapor se descarga para condensarlo en el pozo húmedo
  - ◆ La turbobomba impulsa agua aspirada del pozo húmedo para inyectarla en el reactor
  - ◆ Necesitan:
    - Baterías
    - Temperatura inferior a 100 °C en el pozo húmedo
  
- ▶ Al no haber extracción de calor del edificio, este sistema no puede mantenerse operativo indefinidamente



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Progresión del accidente

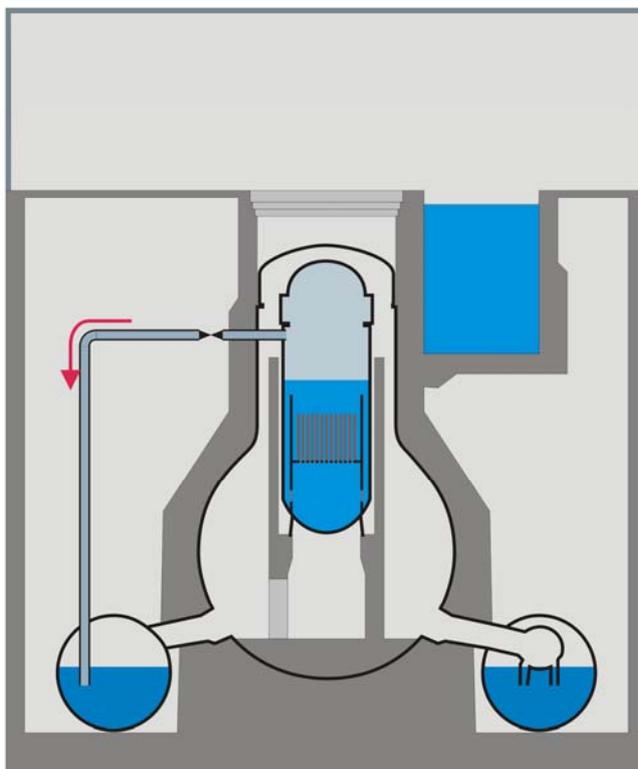
- ▶ Las bombas del sistema de refrigeración del reactor aislado se detienen:
  - ◆ 11.3. 16:36 en la Unidad 1 (Baterías agotadas)
  - ◆ 14.3. 13:25 en la Unidad 2 (Fallo de la bomba)
  - ◆ 13.3. 2:44 en la Unidad 3 (Baterías agotadas)
- ▶ El calor residual de desintegración sigue produciendo vapor en la vasija del reactor
  - ◆ La presión crece



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Progresión del accidente

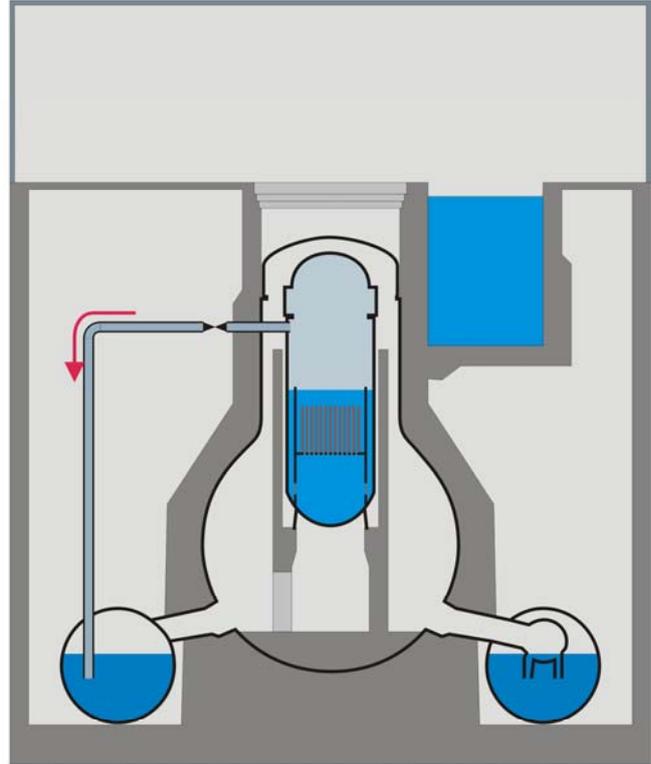
- ▶ Las bombas del sistema de refrigeración del reactor aislado se detienen:
  - ◆ 11.3. 16:36 en la Unidad 1 (Baterías agotadas)
  - ◆ 14.3. 13:25 en la Unidad 2 (Fallo de la bomba)
  - ◆ 13.3. 2:44 en la Unidad 3 (Baterías agotadas)
- ▶ El calor residual de desintegración sigue produciendo vapor en la vasija del reactor
  - ◆ La presión crece
- ▶ Abren las válvulas de alivio
  - ◆ Descargan vapor a la piscina de supresión
- ▶ Desciende el nivel de agua líquida en la vasija del reactor



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

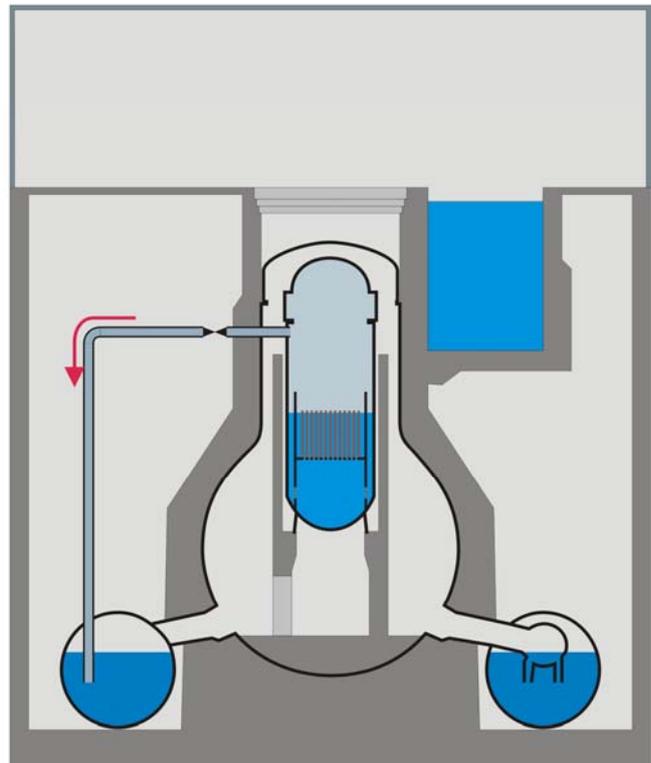
- ▶ Las bombas del sistema de refrigeración del reactor aislado se detienen:
  - ◆ 11.3. 16:36 en la Unidad 1 (Baterías agotadas)
  - ◆ 14.3. 13:25 en la Unidad 2 (Fallo de la bomba)
  - ◆ 13.3. 2:44 en la Unidad 3 (Baterías agotadas)
- ▶ El calor residual de desintegración sigue produciendo vapor en la vasija del reactor
  - ◆ La presión crece
- ▶ Abren las válvulas de alivio
  - ◆ Descargan vapor a la piscina de supresión
- ▶ Desciende el nivel de agua líquida en la vasija del reactor



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

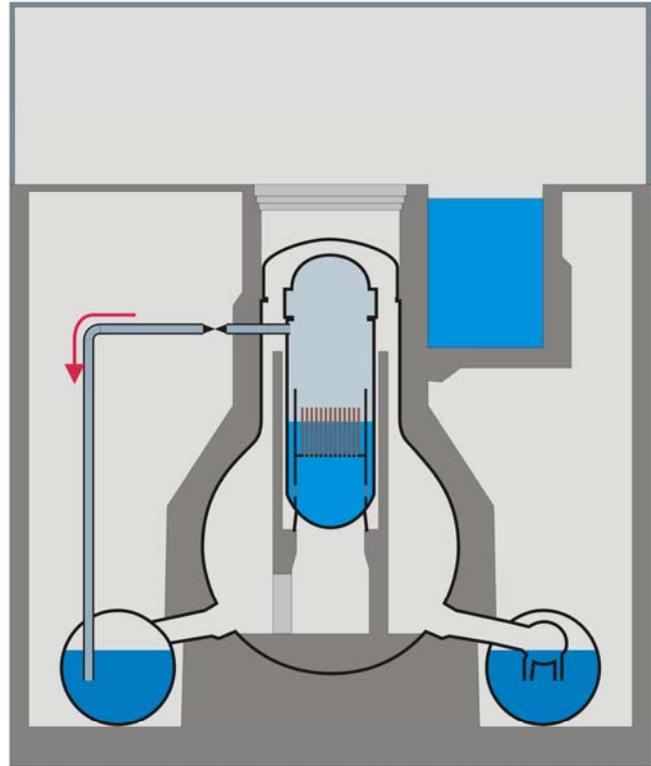
- ▶ Las bombas del sistema de refrigeración del reactor aislado se detienen:
  - ◆ 11.3. 16:36 en la Unidad 1 (Baterías agotadas)
  - ◆ 14.3. 13:25 en la Unidad 2 (Fallo de la bomba)
  - ◆ 13.3. 2:44 en la Unidad 3 (Baterías agotadas)
- ▶ El calor residual de desintegración sigue produciendo vapor en la vasija del reactor
  - ◆ La presión crece
- ▶ Abren las válvulas de alivio
  - ◆ Descargan vapor a la piscina de supresión
- ▶ Desciende el nivel de agua líquida en la vasija del reactor



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Progresión del accidente

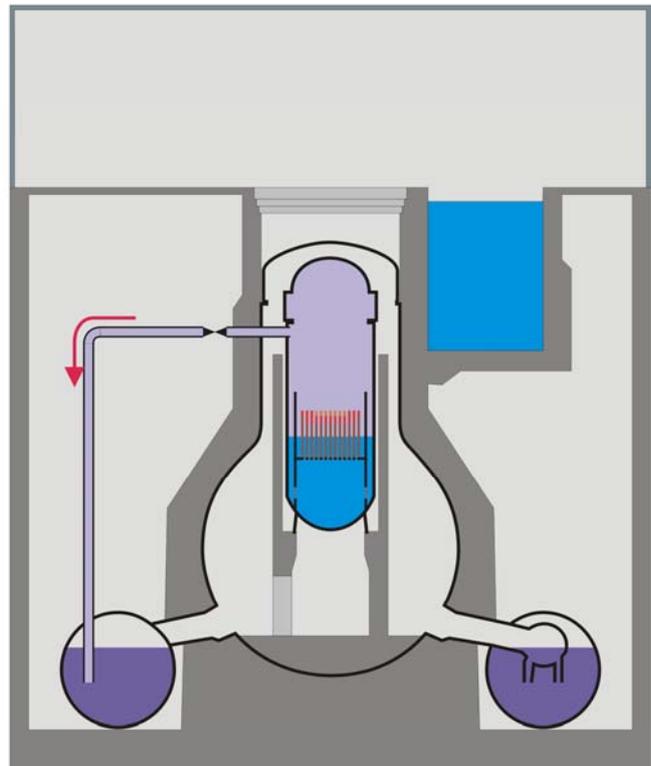
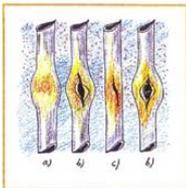
- ▶ Las bombas del sistema de refrigeración del reactor aislado se detienen:
  - ◆ 11.3. 16:36 en la Unidad 1 (Baterías agotadas)
  - ◆ 14.3. 13:25 en la Unidad 2 (Fallo de la bomba)
  - ◆ 13.3. 2:44 en la Unidad 3 (Baterías agotadas)
- ▶ El calor residual de desintegración sigue produciendo vapor en la vasija del reactor
  - ◆ La presión crece
- ▶ Abren las válvulas de alivio
  - ◆ Descargan vapor a la piscina de supresión
- ▶ Desciende el nivel de agua líquida en la vasija del reactor



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Progresión del accidente

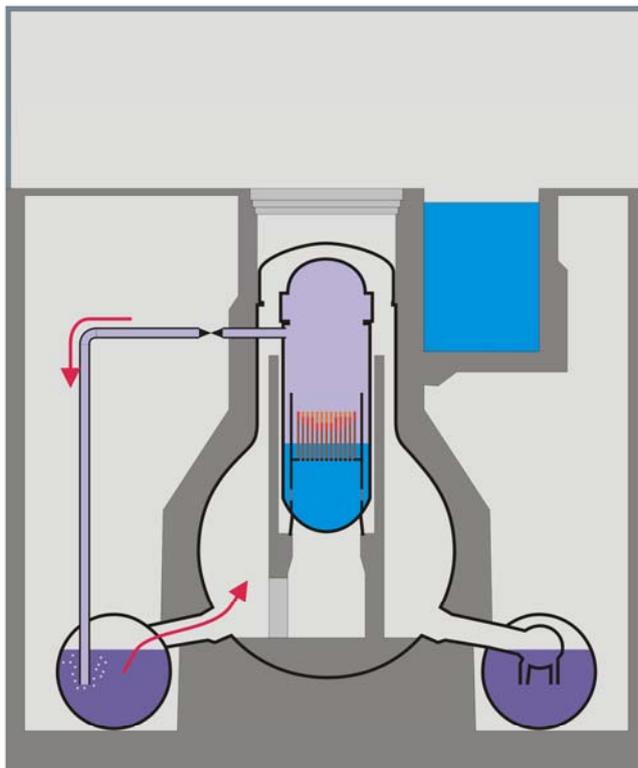
- ▶ El nivel de líquido medido, y así referenciado, es el nivel sin burbujas. El nivel al cual llega el líquido queda más arriba, mezclado con burbujas de vapor
- ▶ ~50% del núcleo descubierto
  - ◆ La temperatura de las vainas del combustible crece, aunque sin producirse aún daños significativos
- ▶ ~2/3 del núcleo descubierto
  - ◆ La temperatura de las vainas sube por encima de los ~900°C
  - ◆ Hinchamiento / Rotura de las vainas
  - ◆ Liberación de los productos de fisión acumulados en forma gaseosa en el hueco de las vainas



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

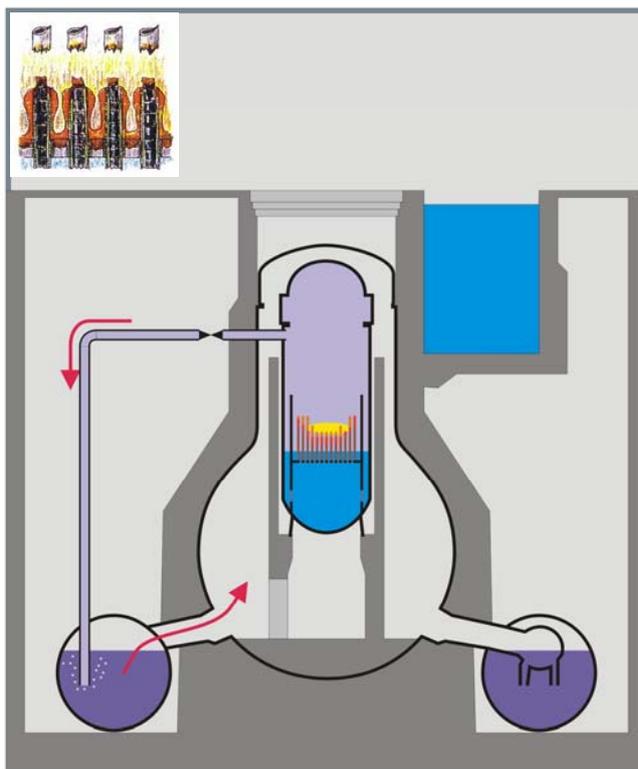
- ▶ ~3/4 del núcleo descubierto
  - ◆ Las vainas superan los ~1200°C
  - ◆ El circonio de las vainas comienza a oxidarse violentamente con el vapor caliente
  - ◆  $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$
  - ◆ La reacción metal-agua es exotérmica y produce más calentamiento para el núcleo
  - ◆ Se genera hidrógeno
    - Unidad 1: 300-600 kg
    - Unidades 2/3: 300-1000kg
  - ◆ El hidrógeno sale impulsado a través del pozo húmedo y de los rompedores de vacío hacia el pozo seco



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Posible progresión del accidente

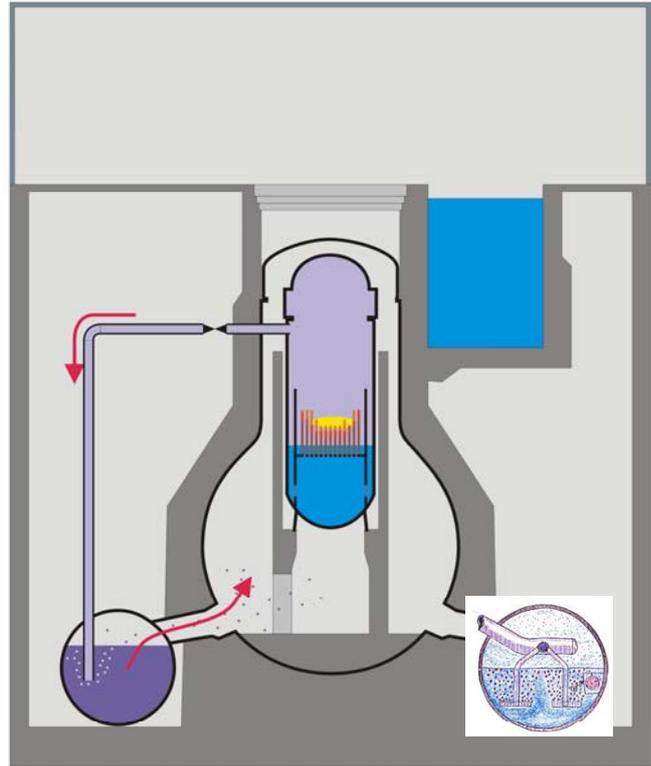
- ▶ A ~1800°C [Unidades 1,2,3]
  - ◆ Fusión de las vainas
  - ◆ Fusión de las estructuras de acero
- ▶ A ~2500°C [Unidades 1,2]
  - ◆ Rotura de las barras de combustible
  - ◆ Capa de material resolidificado y escombros dentro del núcleo
- ▶ A ~2700°C [Unidad 1]
  - ◆ Fusión de los eutécticos Uranio-Circonio
- ▶ La recuperación del suministro de agua detiene la progresión del accidente en las tres unidades
  - ◆ Unidad 1: 12.3. 20:20 (27h sin agua)
  - ◆ Unidad 2: 14.3. 20:33 (7h sin agua)
  - ◆ Unidad 3: 13.3. 9:38 (7h sin agua)



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

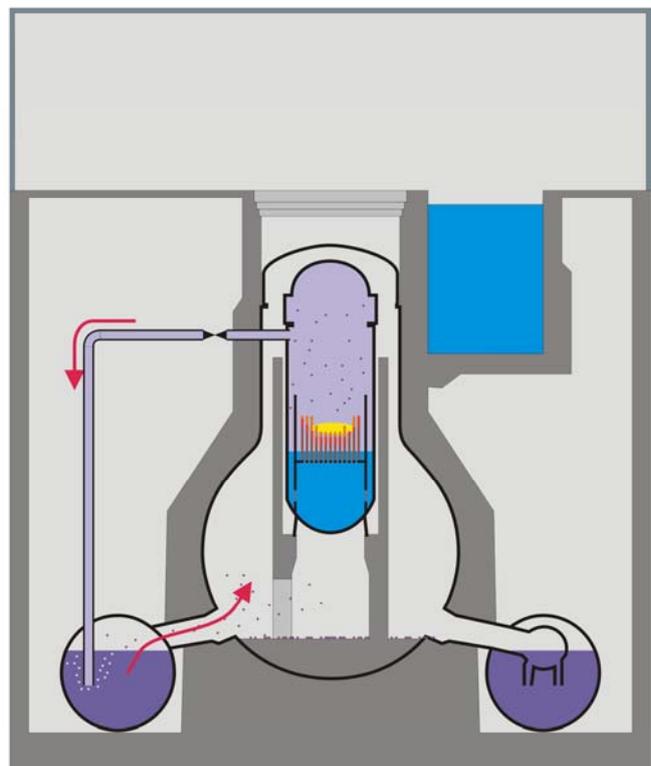
- ▶ Liberación de productos de fisión durante la fusión del combustible
  - ◆ Gases y volátiles: Xenon, Cesio, Yodo,...
  - ◆ El Uranio/Plutonio permanecen en el combustible
  - ◆ Los productos de fisión pueden condensarse en aerosoles aerotransportados, formado partículas
- ▶ Descarga en la piscina de supresión a través de las válvulas de alivio
  - ◆ El borboteo retiene una fracción de los aerosoles en el agua
- ▶ Los gases nobles y los aerosoles entran en el pozo seco
  - ◆ Se pueden producir depósitos de aerosoles en las superficies, lo que produce cierta descontaminación



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

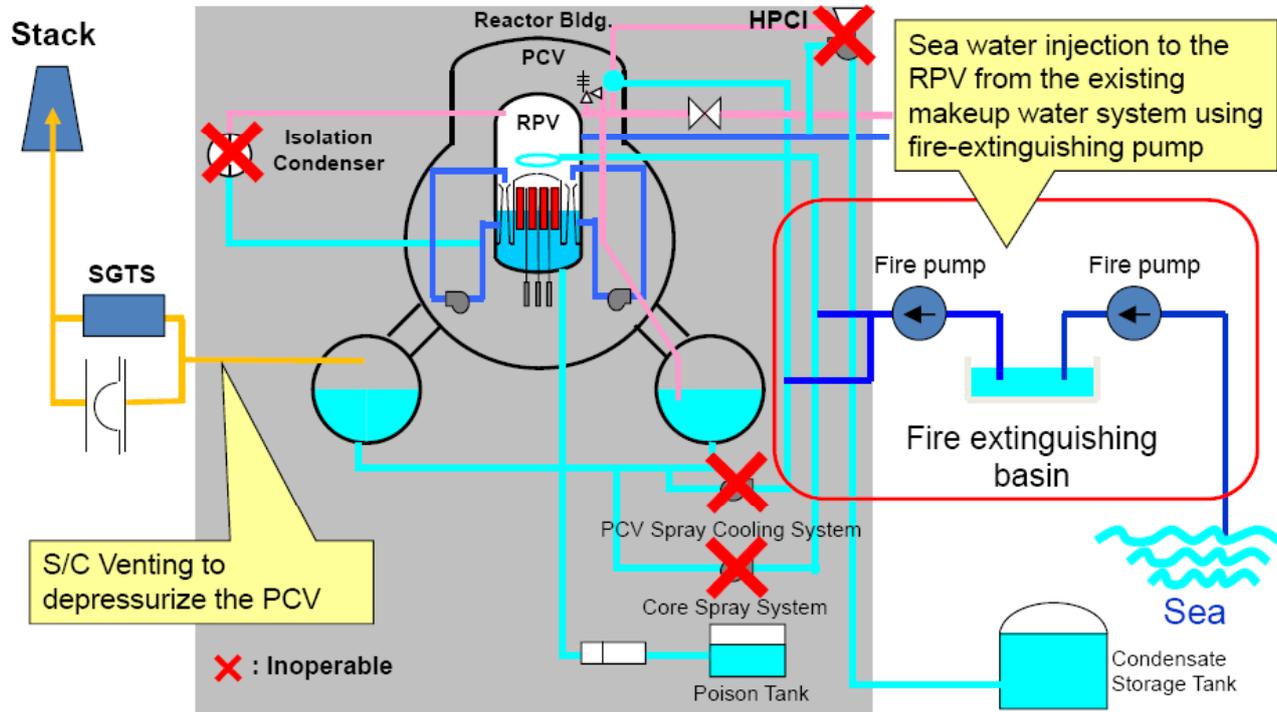
- ▶ Contención
  - ◆ Última barrera frente al escape de los productos de fisión a la atmósfera.
  - ◆ Pared de espesor ~3cm
  - ◆ Presión de diseño 4-5bar
- ▶ La presión llegó hasta 8 bar (unidades 1 y 2)
  - ◆ Normalmente, inertizada con nitrógeno como gas de relleno
  - ◆ Hidrógeno procedente de la oxidación del núcleo
  - ◆ La piscina de supresión alcanzó ebullición (como una olla a presión)
- ▶ Despresurización de la contención
  - ◆ Unidad 1: 12.3. 4:00
  - ◆ Unidad 2: 13.3 00:00
  - ◆ Unidad 3: 13.3. 8.41



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

- Se inyecta agua de mar empleando motobombas de lucha contra incendios
- Se ventea la piscina de supresión para despresurizar la contención

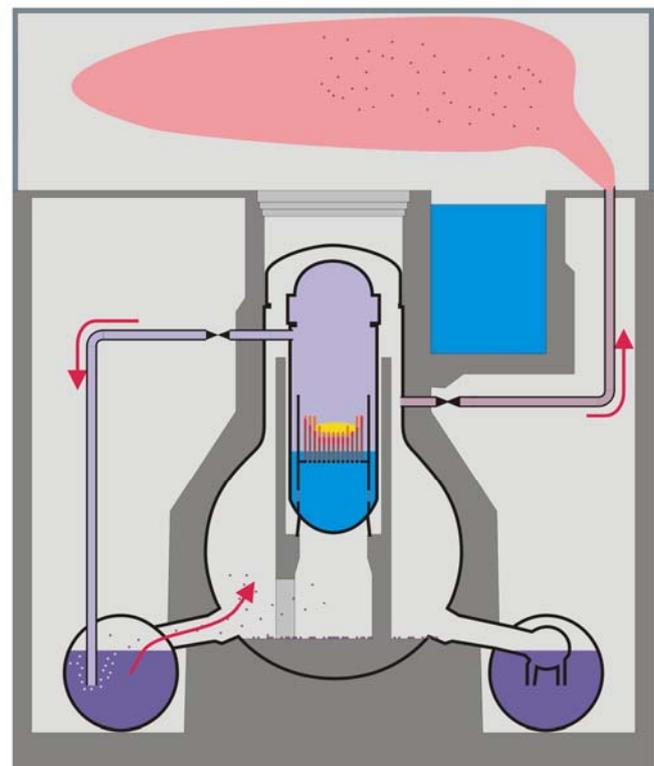


Adaptada de NISA-METI

35

# Progresión del accidente

- ▶ Aspectos positivos y negativos de la despresurización de la contención
  - ◆ Extraer energía del edificio del reactor (no había otra manera)
  - ◆ Reducir la presión a ~4 bar
  - ◆ Libera pequeñas cantidades de productos de fisión en aerosoles (yodo, cesio ~0.1%)
  - ◆ Libera todos los gases nobles
  - ◆ Libera el hidrógeno
- ▶ El gas se liberó a la planta de operación
  - ◆ Parece que en Fukushima no hay venteo directo al exterior, o que la válvula es motorizada, o que el conducto de venteo no soporta esa presión tan elevada (¿?)
  - ◆ El H<sub>2</sub> es inflamable

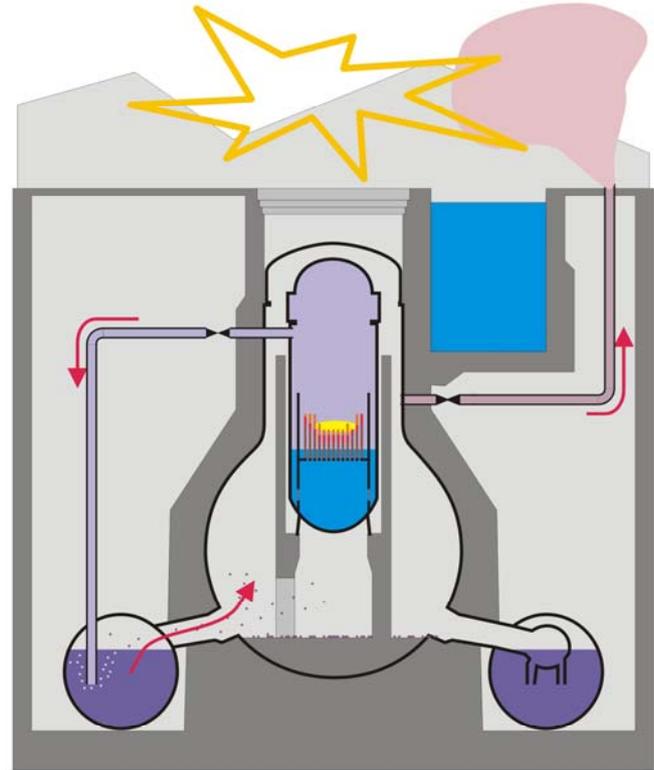


Adaptada de Mathias Braun, AREVA

# Progresión del accidente

## ▶ Unidades 1 y 3

- ◆ El H<sub>2</sub> se inflamó (detonación) en la planta de operación
- ◆ Provocó la destrucción de la estructura del edificio
- ◆ La contención de hormigón armado pareció resistir sin daños
- ◆ Daños muy aparentes, aunque no muy severos desde el punto de vista de la seguridad del reactor



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

Explosión en el Grupo 1. 12 de marzo 15:36

Explosión en el Grupo 3. 14 de marzo 11:01

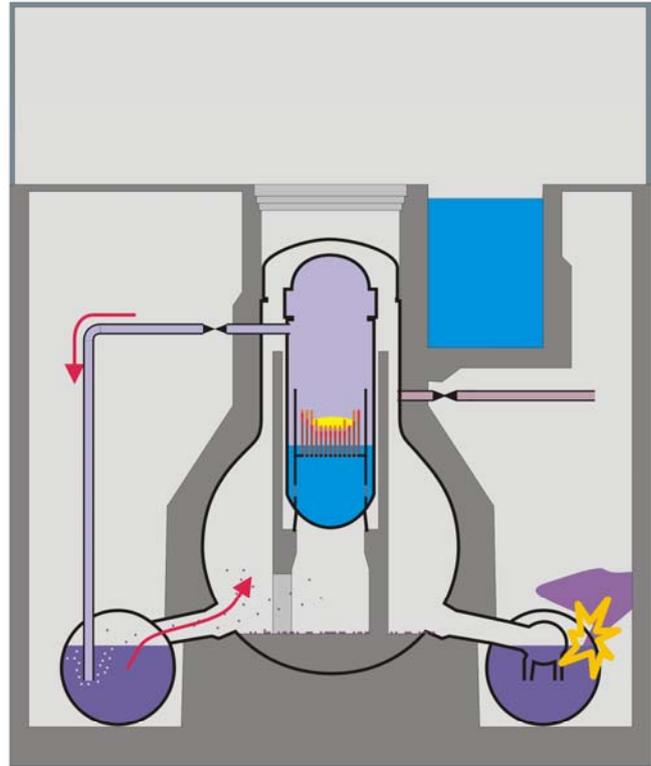


Unit 1

Unit 3

## Explosión en el Grupo 2. 15 de marzo 6:10

- ▶ Unidad 2
  - ◆ Combustión de hidrógeno dentro del edificio del reactor
  - ◆ Daño probable en la piscina de supresión (agua fuertemente contaminada)
  - ◆ Liberación incontrolada de gases desde la contención
  - ◆ Gran liberación de productos de fisión
  - ◆ Evacuación temporal de la planta
  - ◆ Tasas de dosis tan elevadas en el entorno que impiden seguir trabajando en la recuperación
- ▶ No hay una explicación clara de porqué se comportó de forma diferente



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

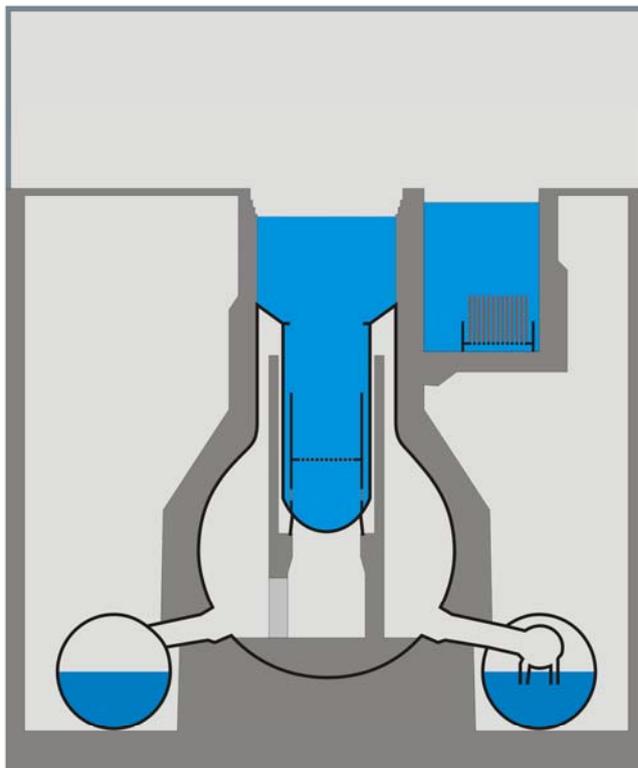
## Fukushima.

### Situación actual de los reactores

- ▶ Están recibiendo inyección de agua dulce en las vasijas mediante bombas eléctricas con respaldo de generadores diesel. Todo ello provisional.
  - ◆ En la **unidad 1** el nivel de agua cubre algo más de la mitad del combustible. Se mantiene estable la temperatura y presión de la vasija. La presión de la contención ha aumentado ligeramente tras la inyección de gas nitrógeno realizada para evitar explosiones de hidrógeno.
  - ◆ En la **unidad 2** sus parámetros se mantienen estables, con agua cubriendo más de la mitad de altura del combustible, presión reducida en la vasija del reactor y temperatura moderada en esta. La contención está ya despresurizada.
  - ◆ La **unidad 3** es la que tiene menor nivel de agua en el combustible dentro de la vasija del reactor, pero sus parámetros son muy aceptables, se mantiene estable la presión y la temperatura en la vasija y la contención está completamente despresurizada.
- ▶ Refrigeración en "circuito abierto" liberando vapor a la atmósfera.
- ▶ Cabe esperar que continúe habiendo pequeñas liberaciones de productos de fisión en comparación a los momentos más críticos.

## Progresión del accidente. Piscinas

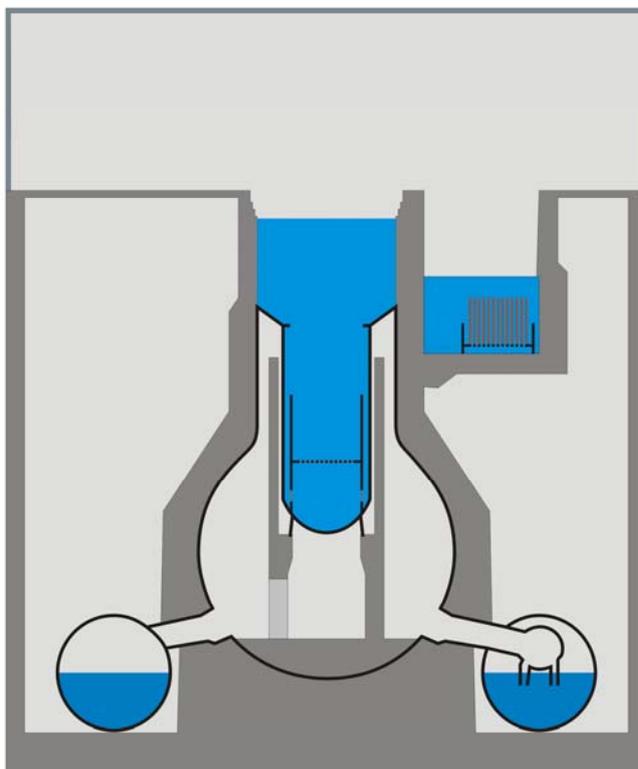
- ▶ La piscina de enfriamiento se encuentra en la planta de operación del edificio del reactor
  - ◆ Por mantenimiento del reactor 4 todo el núcleo en la piscina (1331 elementos combustibles)
  - ◆ Secado de las piscinas (AREVA):
    - Unidad 4: en 10 días
    - Unidad 1-3, 5, 6 en algunas semanas
  - ◆ ¿Fugas de las piscinas por causa del terremoto?
- ▶ Consecuencias
  - ◆ Deterioro o tal vez fusión del núcleo "al aire libre"
  - ◆ Generación de hidrógeno
  - ◆ Prácticamente sin retención de productos de fisión
  - ◆ Escape grande



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Progresión del accidente. Piscinas

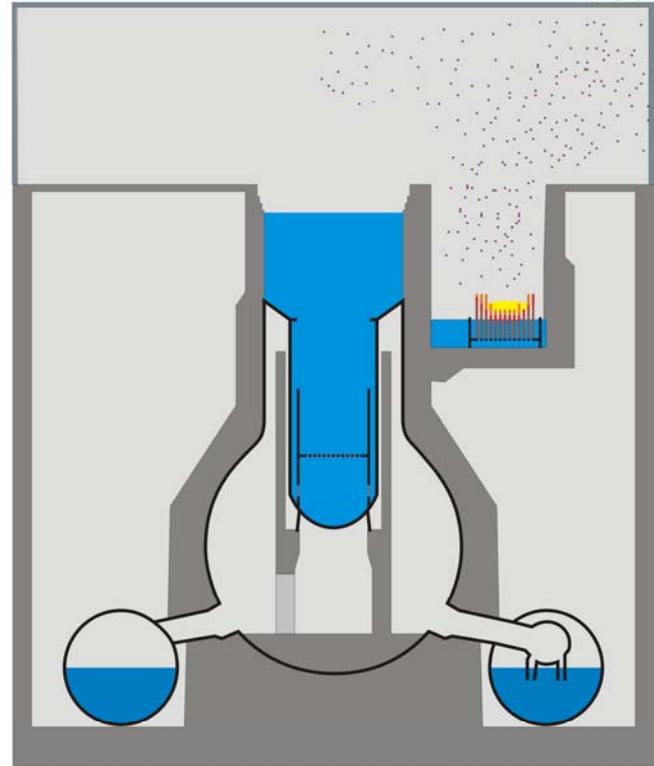
- ▶ La piscina de enfriamiento se encuentra en la planta de operación del edificio del reactor
  - ◆ Por mantenimiento del reactor 4 todo el núcleo en la piscina (1331 elementos combustibles)
  - ◆ Secado de las piscinas (AREVA):
    - Unidad 4: en 10 días
    - Unidad 1-3, 5, 6 en algunas semanas
  - ◆ ¿Fugas de las piscinas por causa del terremoto?
- ▶ Consecuencias
  - ◆ Deterioro o tal vez fusión del núcleo "al aire libre"
  - ◆ Generación de hidrógeno
  - ◆ Prácticamente sin retención de productos de fisión
  - ◆ Escape grande



Adaptada de Mathias Braun, AREVA

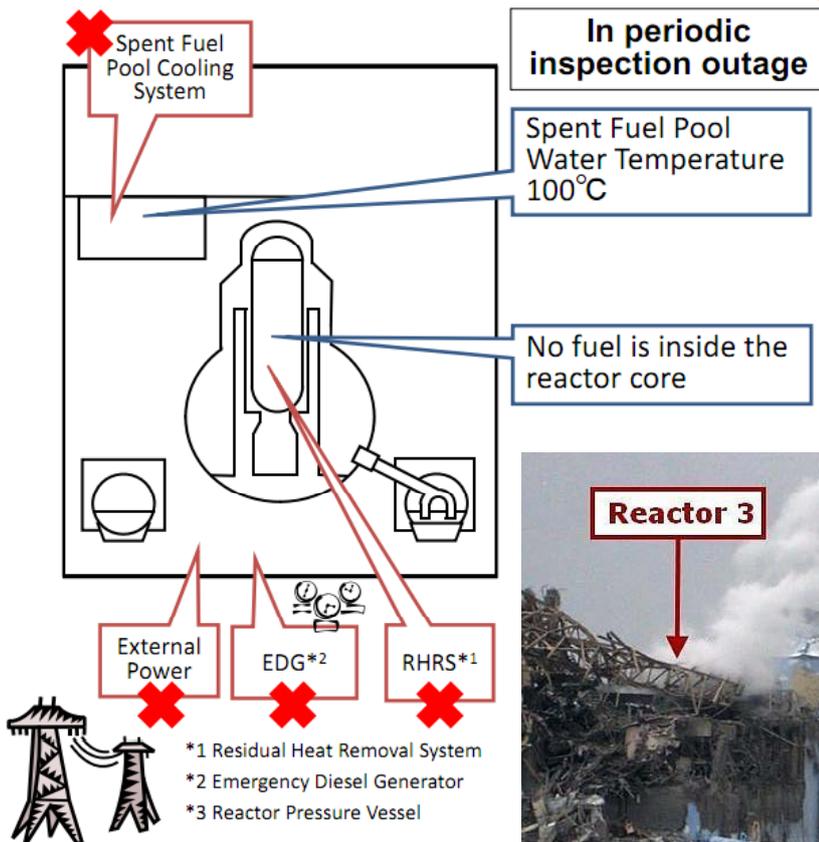
# Progresión del accidente. Piscinas

- ▶ La piscina de enfriamiento se encuentra en la planta de operación del edificio del reactor
  - ◆ Por mantenimiento del reactor 4 todo el núcleo en la piscina (1331 elementos combustibles)
  - ◆ Secado de las piscinas (AREVA):
    - Unidad 4: en 10 días
    - Unidad 1-3, 5, 6 en algunas semanas
  - ◆ ¿Fugas de las piscinas por causa del terremoto?
- ▶ Consecuencias
  - ◆ Deterioro o tal vez fusión del núcleo "al aire libre"
  - ◆ Generación de hidrógeno
  - ◆ Prácticamente sin retención de productos de fisión
  - ◆ Escape grande
- ▶ La posibilidad de que haya ocurrido un escape grande desde las piscinas sigue sin confirmarse



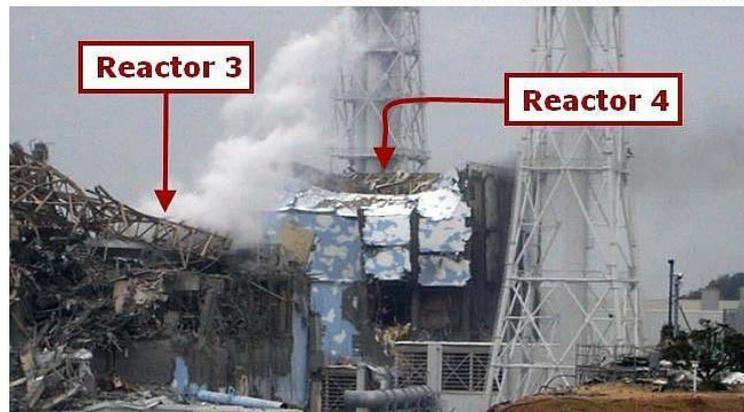
Adaptada de Mathias Braun, AREVA

## Situación el 24 de marzo (5:00) en FUKUSHIMA DAI-ICHI (Unidad 4)



- ▶ Se produjeron dos grandes fuegos por combustión de  $H_2$  el 15 y el 16 de marzo.
  - ◆ Se intentó refrigerar mediante lanzamiento de agua desde helicópteros y luego con motobombas y cañones de agua de bomberos

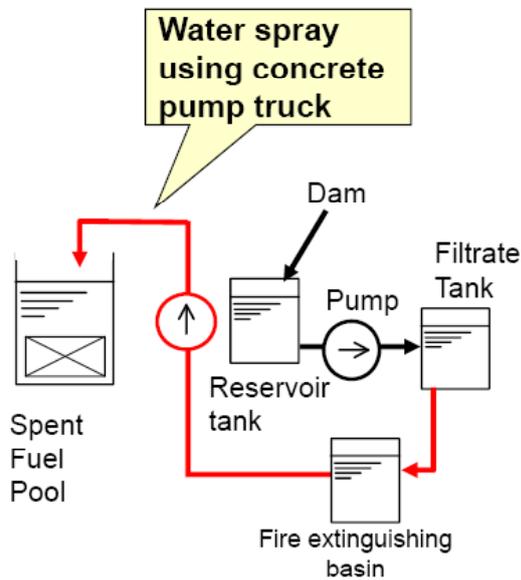
Adaptada de NISA-METI



# Medidas para refrigerar las piscinas

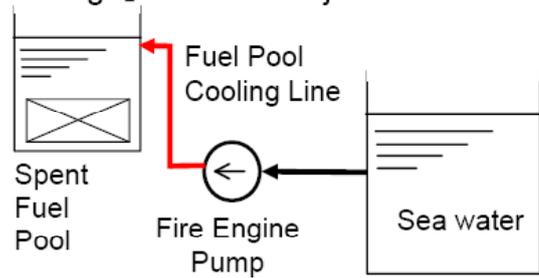
## Unit 1

Fresh water injection

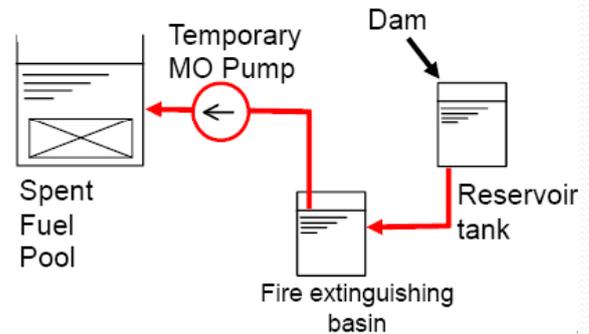


## Unit 2

【1st Stage】 Sea water injection



【2nd Stage】 Fresh water injection

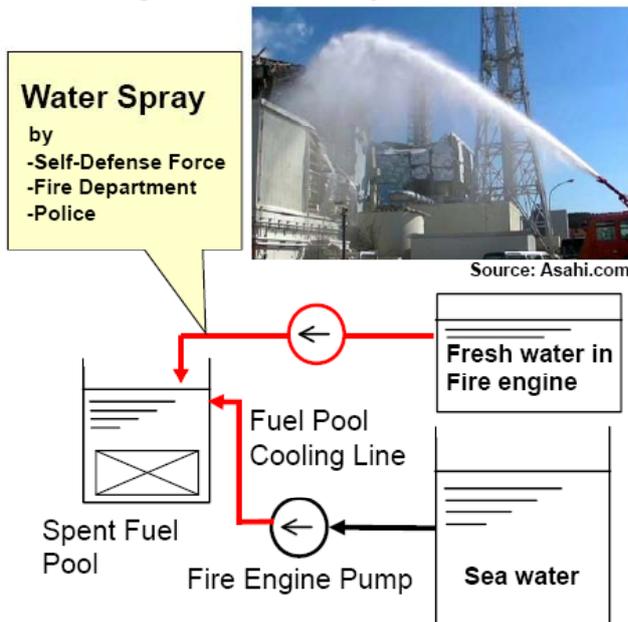


Adaptada de NISA-METI

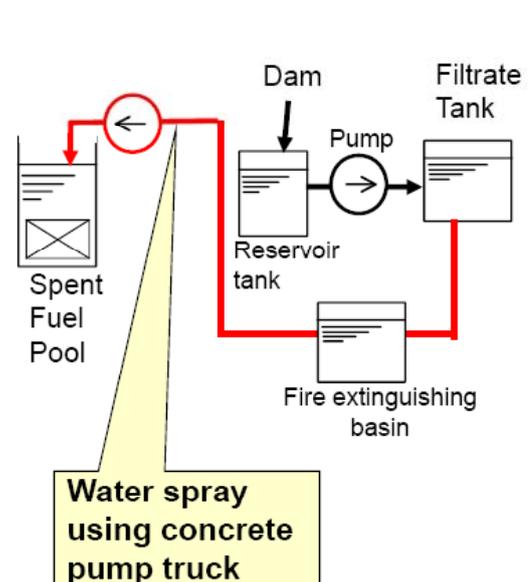
# Medidas para refrigerar las piscinas

## Unit 3

【1st Stage】 Sea water injection



【2nd Stage】 Fresh water injection



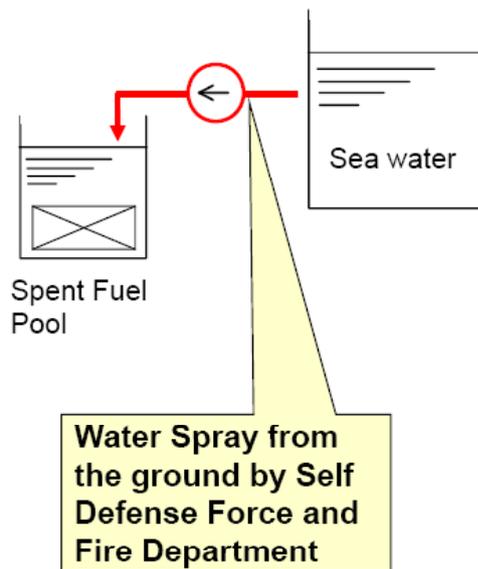
\* Sea water discharge by helicopters of the Self Defense Force

Adaptada de NISA-METI

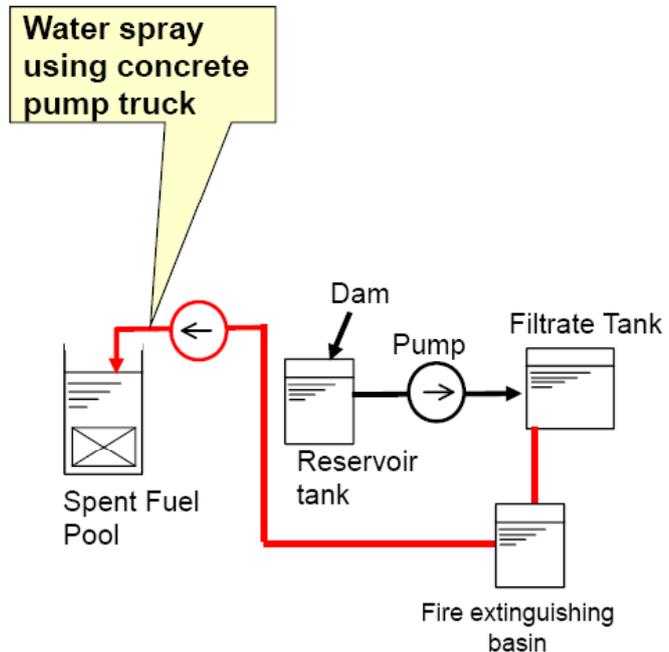
# Medidas para refrigerar las piscinas

## Unit 4

【1st Stage】 Sea water injection



【2nd Stage】 Fresh water injection



Adaptada de NISA-METI

## Fukushima.

### Pasos para mejorar el control

- ▶ Restablecimiento de suministro eléctrico externo
- ▶ Algunos incendios de posible origen eléctrico
- ▶ Iluminación de las salas de control
- ▶ “Sorpresas” al encontrar inundaciones con alta contaminación radiactiva en los edificios de turbinas y túneles exteriores de cables
  - ◆ En la **unidad 2** tasas de dosis del orden de 1000 mSv/h en la superficie del agua.
  - ◆ El túnel exterior a la unidad 2, presentaba una grieta que permitió la descarga directa al mar de agua extremadamente contaminada durante varios días.
- ▶ Vaciado al mar de los tanques del sistema de tratamiento de residuos líquidos (10.000 m<sup>3</sup>) y los túneles de las unidades 5 y 6 (1.500 m<sup>3</sup>) para ganar capacidad de almacenamiento
- ▶ Drenaje de los túneles exteriores
- ▶ Drenaje de los edificios a los condensadores, previo vaciado de estos a los tanques de agua de reposición.
- ▶ Retirada de escombros con maquinaria pesada operada remotamente.
- ▶ Intentos de recuperar equipos de refrigeración de la propia central.
- ▶ Tareas pendientes de muy larga duración (¿meses?) hasta conseguir una situación estable y mantenible a largo plazo

## Fukushima. Principales referencias

Para obtener información más puntual y actualizada, la SEPR sugiere consultar los medios de comunicación, y en particular con los siguientes organismos e instituciones:

- ▶ Organismo Internacional de la Energía Atómica: [www.iaea.org](http://www.iaea.org)
- ▶ Consejo de Seguridad Nuclear: [www.csn.es](http://www.csn.es)
- ▶ Organización Mundial de la Salud: [www.who.int](http://www.who.int)
- ▶ Organismo regulador japonés: [www.nisa.meti.go.jp/english](http://www.nisa.meti.go.jp/english)
- ▶ Ministerio de Ciencia japonés: <http://www.mext.go.jp/english/>
- ▶ Foro de la industria atómica japonesa: <http://www.jaif.or.jp/english>
- ▶ WANO (Asociación Mundial de Operadores Nucleares): [www.wano.info](http://www.wano.info)
- ▶ NEI (Instituto Energía Nuclear): [www.nei.org](http://www.nei.org)
- ▶ TEPCO (Operadora de los reactores afectados): [www.tepco.co.jp](http://www.tepco.co.jp)
- ▶ Foro Nuclear: [www.foronuclear.org](http://www.foronuclear.org)

## Muchas gracias por su atención

