

# Seguridad Nuclear en el PWR-W

**Seminario de Reactores Avanzados**

*ETSI Industriales, Web Version 2017*

**Kevin Fernández-Cosials**

Todo lo que siempre quiso saber sobre  
el PWR-W pero nunca se atrevió a  
preguntar

---

## Seminario de Reactores Avanzados

*ETSI Industriales, Web Version*

**Kevin Fernández-Cosials**

# Explicación sobre la presentación

---

- ❑ La presentación irá comentando los componentes básicos del PWR y se guiará a través de los accidentes.
- ❑ La presentación contiene pequeñas bombillas que son preguntas normalmente complejas sobre la diapositiva en cuestión.
- ❑ Una vez clicada la bombilla se guiará hasta la diapositiva de la pregunta. La diapositiva tiene un botón de retorno que devuelve a la diapositiva original (Get Back)

# Índice

---

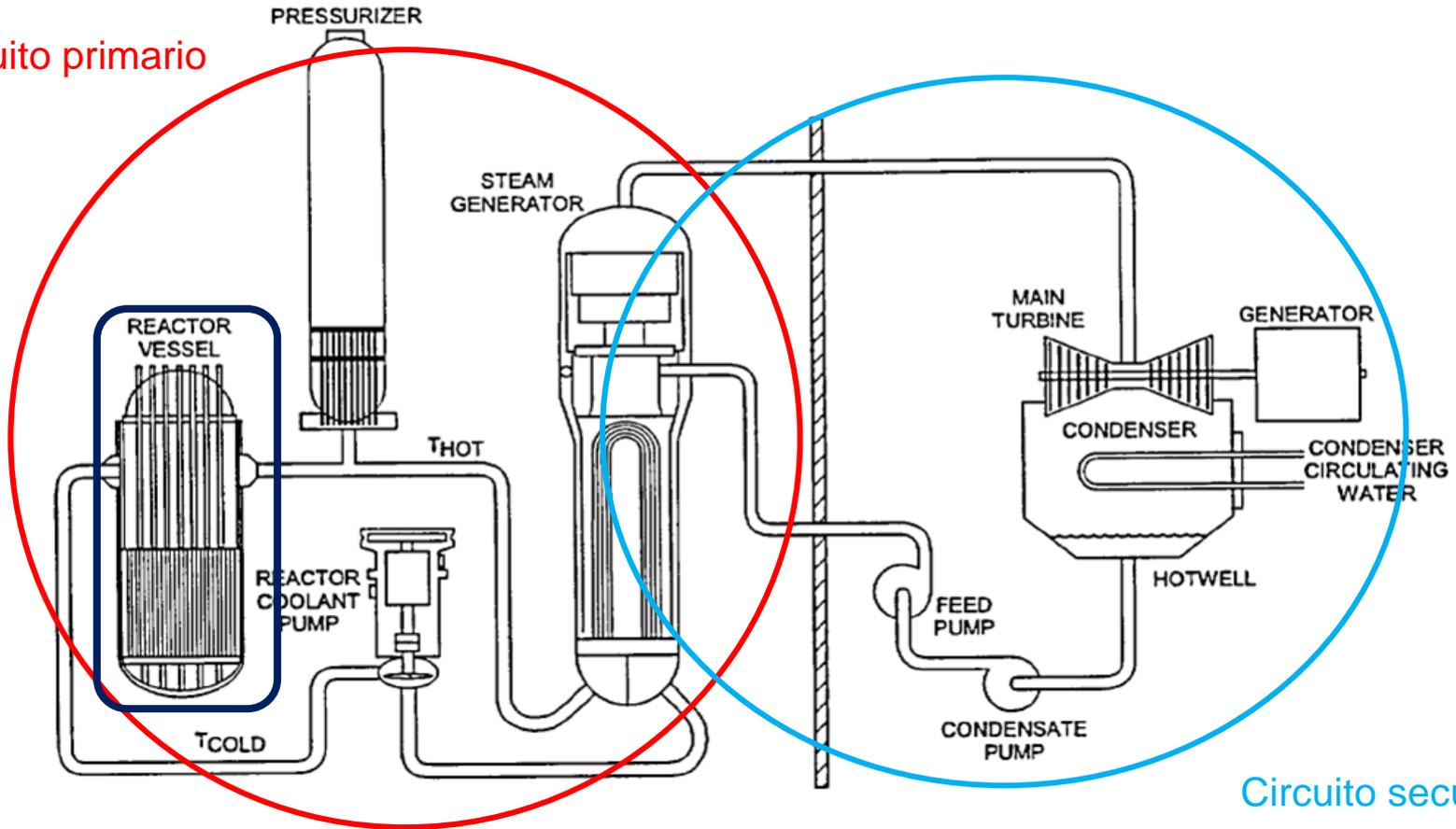
- 1 Introducción: **Componentes** y **Sistemas** básicos
- 2 **Transitorio**: Large Break Loss of Coolant Accident (LBLOCA)
- 3 **Transitorio**: Small Break Loss of Coolant Accident (SBLOCA)
- 4 **Transitorio**: Station BlackOut (SBO)

# 1 Introducción: El Reactor PWR



# Introducción: El Reactor PWR

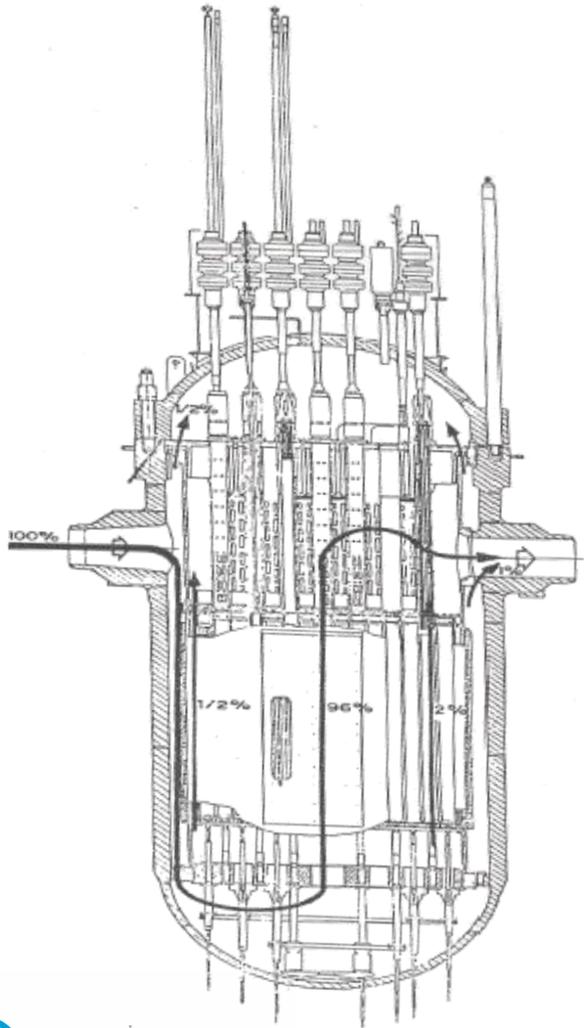
Circuito primario



Circuito secundario

Fluido: moderador, reflector, disolvente, refrigerante

# Componente: Vasija



## Funciones:

- Contiene el núcleo y actúa como barrera de presión del refrigerante.
- Soporta y alinea los componentes internos.
- Carcasa cilíndrica construida de acero al carbono con recubrimiento interior de acero inoxidable austenítico.
- En la parte superior están las toberas de entrada-salida del refrigerante.
- La cabeza es semiesférica, del mismo material y unida a la vasija mediante pernos.
- Lleva penetraciones para la inserción de barras de control y termopares.

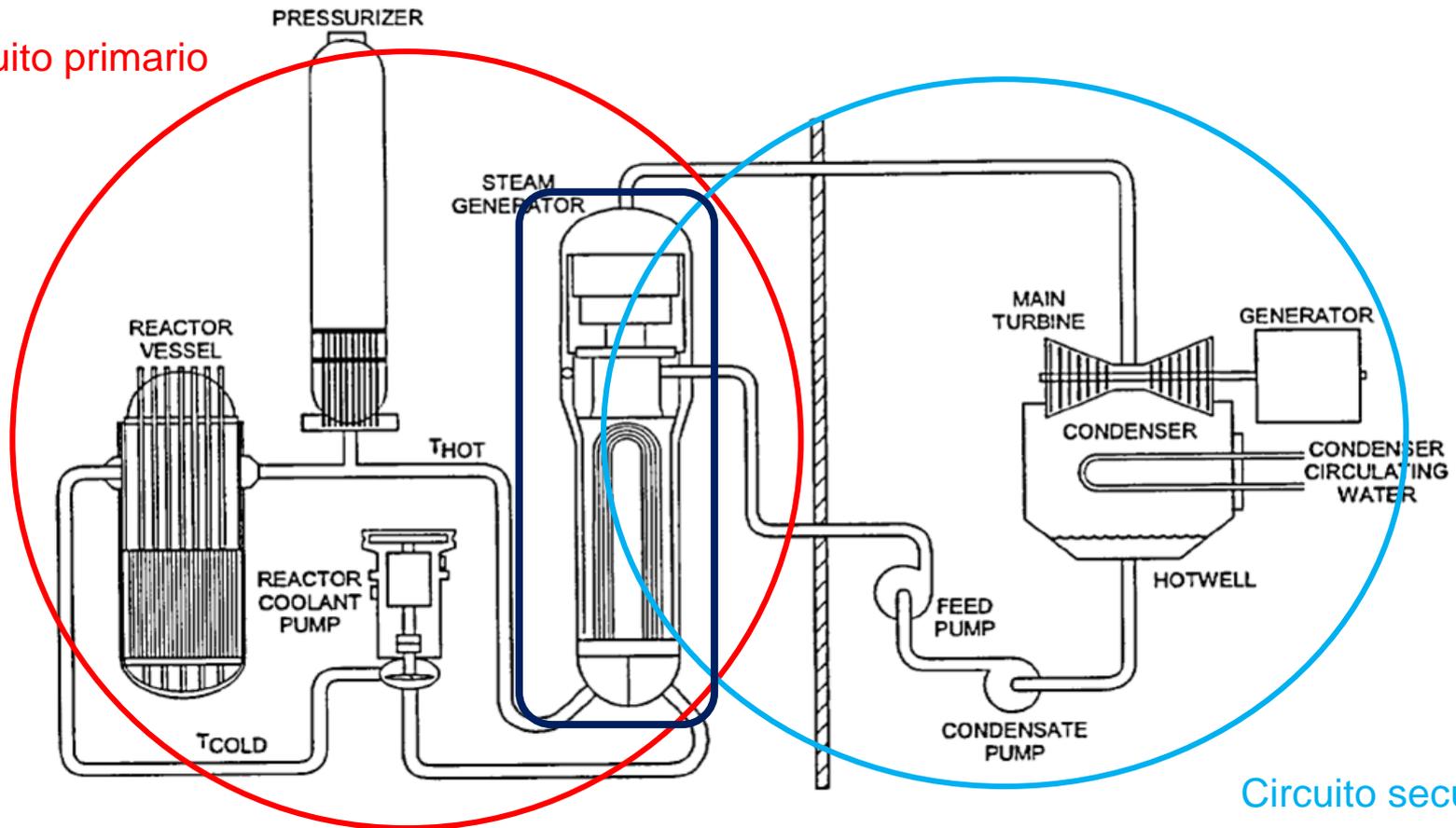
## Parámetros característicos:

- Longitud total con tapa : 12,99 m
- Diámetro interior : 3,99 m
- Presión de operación: 155 kg/cm<sup>2</sup>
- Temperatura : 343°C
- Material : acero al carbono & acero inox



# Introducción: El Reactor PWR

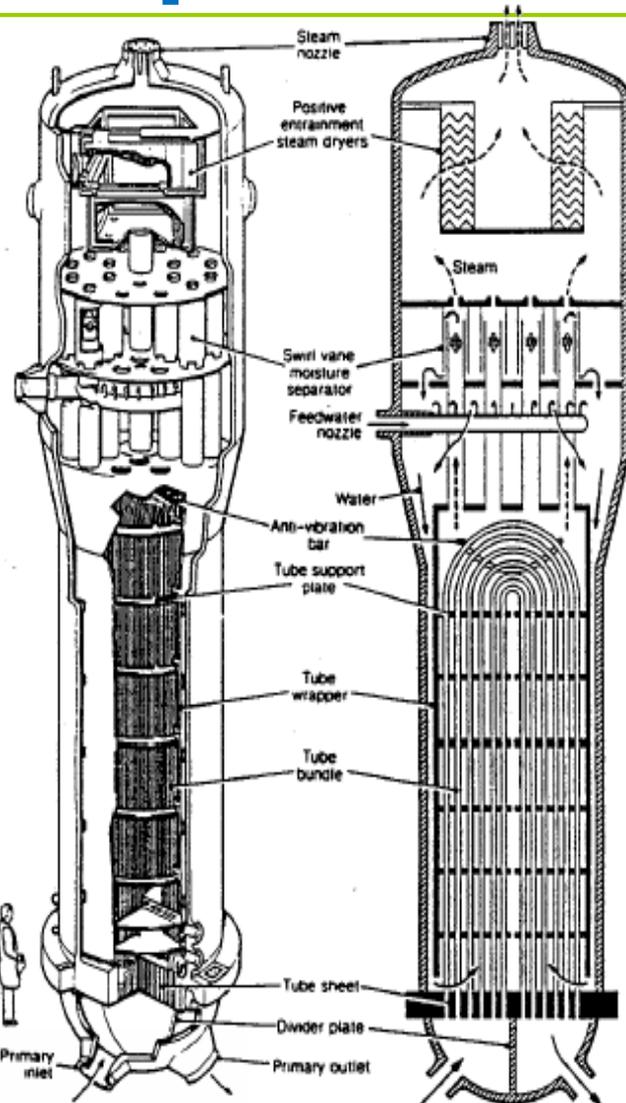
Circuito primario



Circuito secundario

Fluido: moderador, reflector, disolvente, refrigerante

# Componente: Generador de vapor



•Tubos en U

•Tiene una sección de evaporación ( mitad inferior)

•Sección de vapor y separación de humedad ( parte superior)



•Altura total : 22 m

•Diámetro exterior ( superior) : 5,1 m

•Diámetro exterior ( inferior) : 3,8 m

•Presión de funcionamiento : 155 kg/ cm<sup>2</sup> ( lado de tubos)

•Presión de diseño : 172 kg/ cm<sup>2</sup>

•Temperatura de diseño: 343 °C

•Presión lado carcasa: 75,8 kg/cm<sup>2</sup>

•Flujo de refrigerante : 4850 kg/ seg

•Temperatura agua :

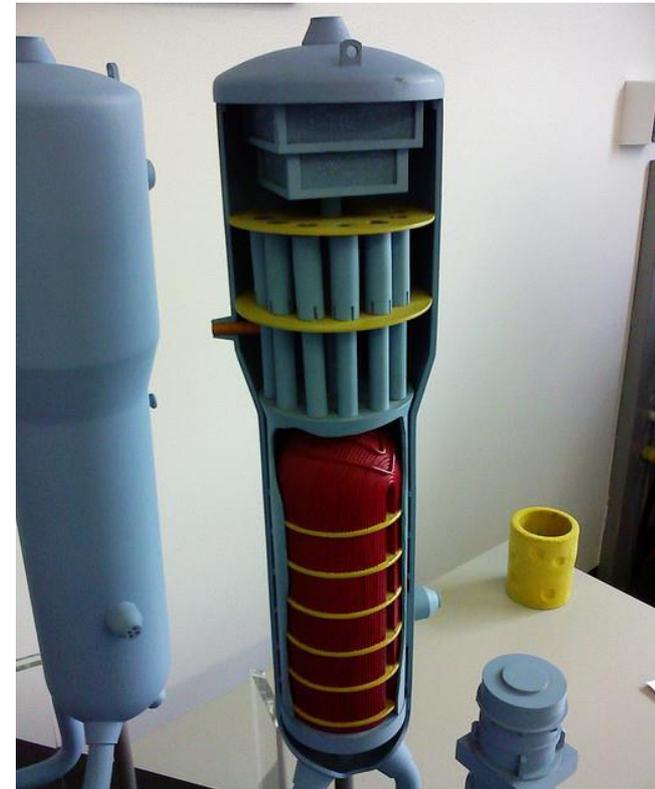
Entrada 332 °C

Salida : 292°C

# Componente: Generador de vapor

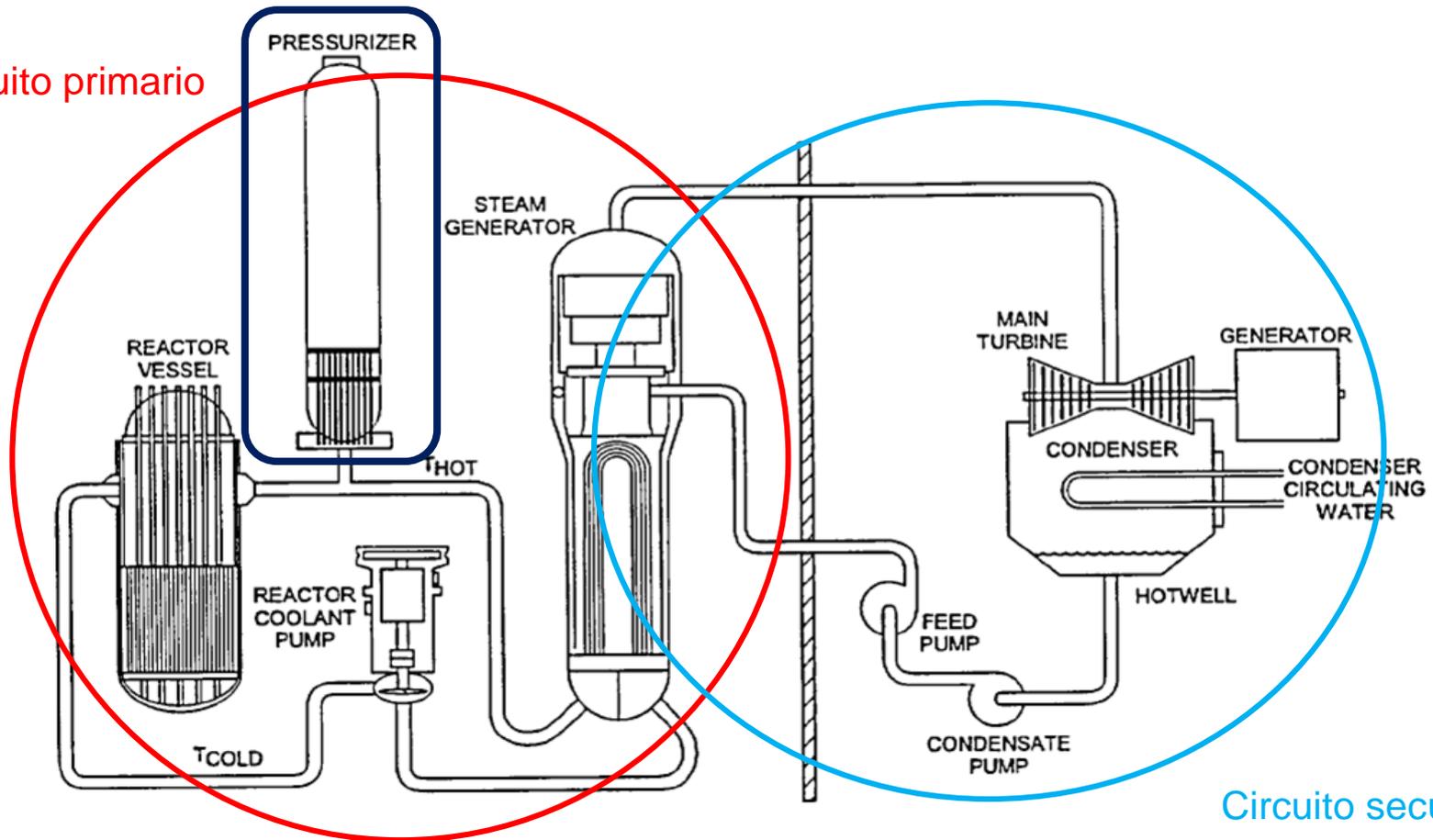
## Características Generales

- Tienen dos partes: la zona de evaporación y la sección de vapor y separación de humedad.
- El lado primario del GV consiste en un fondo hemisférico dividido en dos mitades por la placa de partición y el haz tubular.
- El refrigerante del reactor fluye hacia una de las mitades del fondo y pasa a través de los tubos en U de Inconel. Luego vuelve a la otra mitad del fondo para salir del GV.
- El agua de alimentación fluye entre el haz de tubos.
- Los tubos forman la barrera de separación entre el primario y el secundario.
- El secundario está formado por una carcasa y de una zona superior que tiene el separador de humedad.
- A la salida del haz de tubos , el agua de alimentación se convierte en vapor en un 30%.
- Esta agua se mejora en calidad llegando hasta el 99.75% en vapor seco.



# Introducción: El Reactor PWR

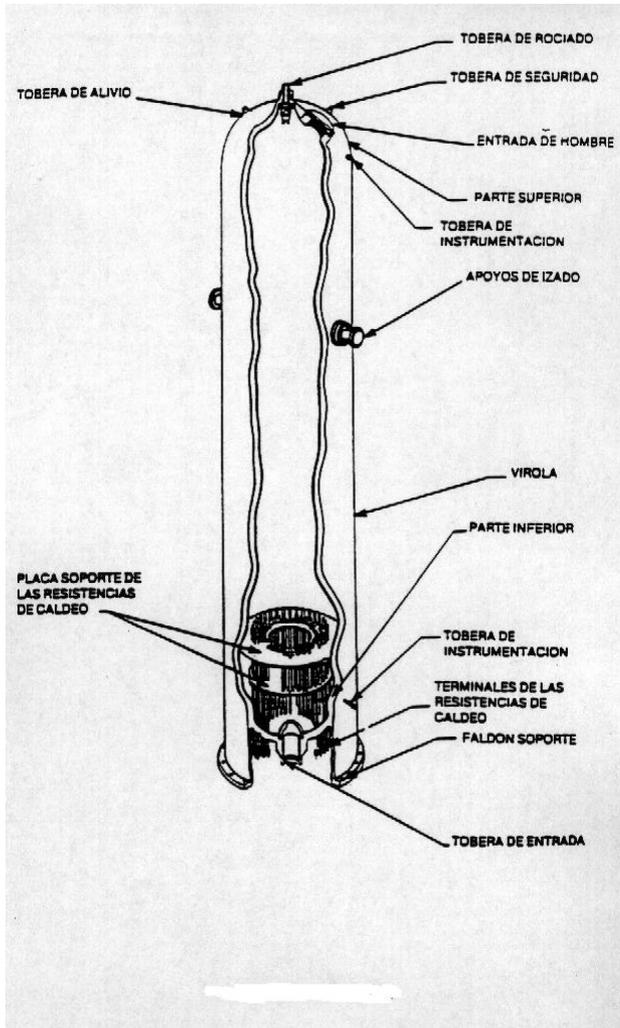
Circuito primario



Circuito secundario

Fluido: moderador, reflector, disolvente, refrigerante

# Componente: Presionador



Mantiene la presión del SRR y limita cambios de presión

Mantiene equilibrio liquido-vapor saturado en el SRR

## Parámetros:

- Altura total : 14,5 m
- Diámetro exterior: 2,3 m
- Presión: 172 kg/cm<sup>2</sup>
- Temperatura: 360°C
- Resistencias de caldeo: 78
- Válvulas de alivio: 2
- Válvulas de seguridad: 3
- Material: acero

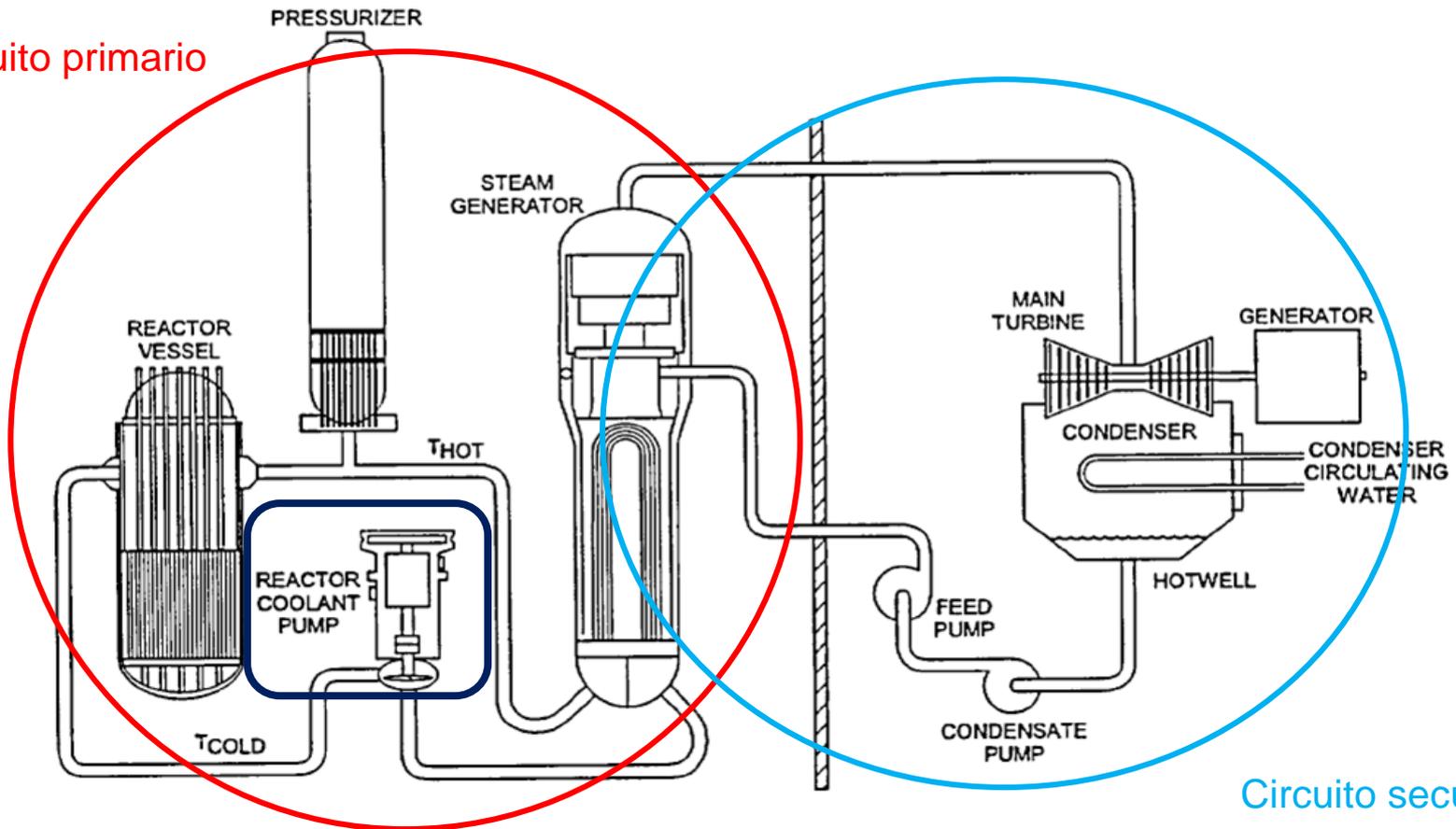
En operación normal el 60% agua y el resto vapor

Existe un sistema de control de nivel del presionador

Existe un sistema de control de la presión del presionador

# Introducción: El Reactor PWR

Circuito primario



Circuito secundario

Fluido: moderador, reflector, disolvente, refrigerante

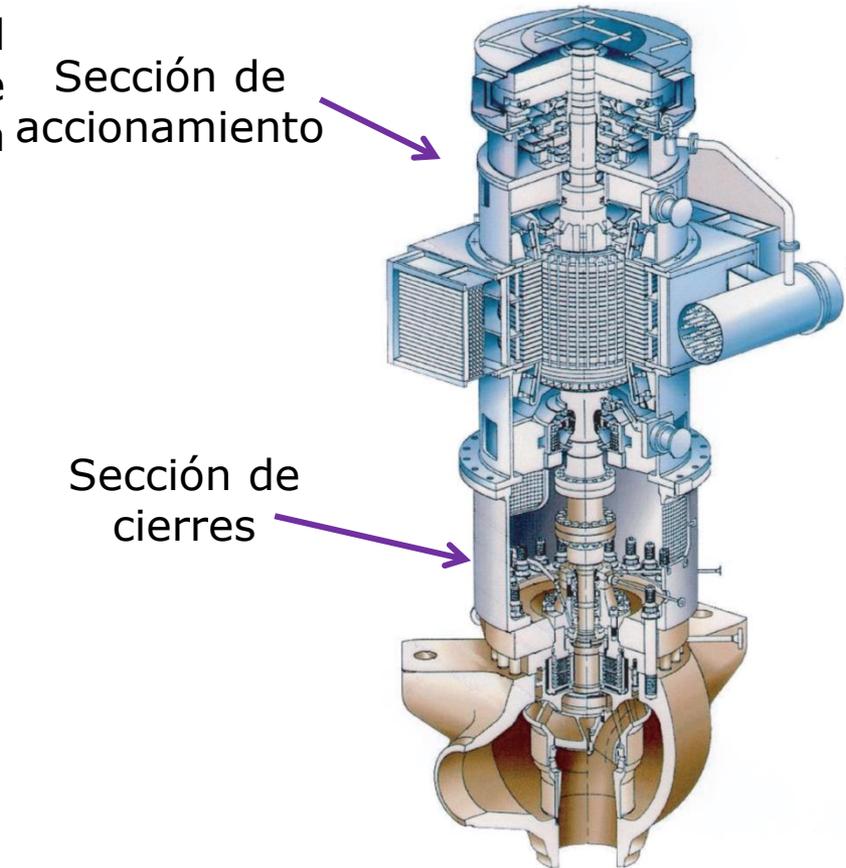
# Componente: Bombas de Refrigeración del Núcleo

## Función:

-Establecer la circulación forzada del refrigerante del reactor procedente del GV para enviarlo de nuevo a la vasija del reactor.

- Bomba vertical centrífuga
- Caudal nominal: 21508 m<sup>3</sup>/h
- Altura manométrica total: 89 cm
- Temperatura succión: 291°C
- Velocidad de giro 1485 rpm

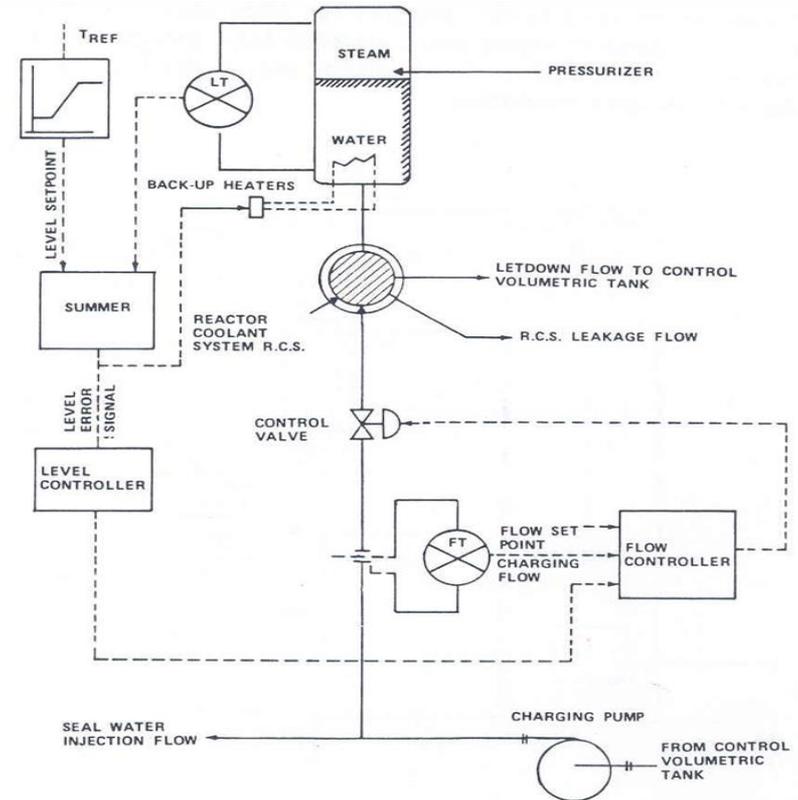
## Partes



Sección hidráulica

# Sistema: Sistemas de control del reactor

- Sistema de control de barras
- Sistema de control de presión del presionador
- Sistema de control de nivel del presionador
- Sistema de control de baipás de turbina, MSB
- Sistema de control de agua de alimentación principal
- Sistema de control electrohidráulico de turbina, DEH
- Sistema de mitigación de ATWS (transitorios anticipados sin disparo del reactor)
- Sistema de mitigación de sobrepresiones en frío, COMS



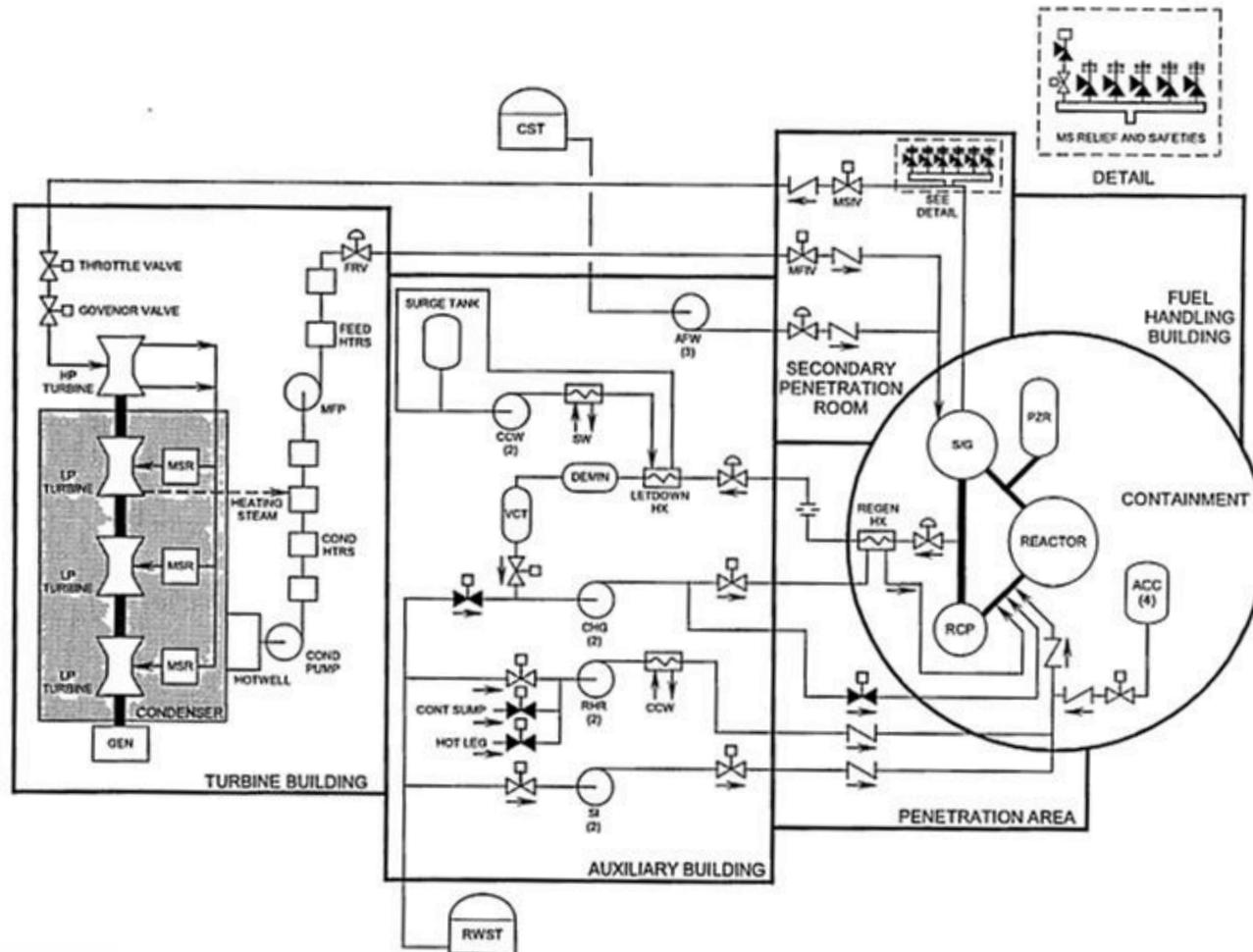
# Sistema:

## Sistemas de protección del reactor

---

- Disparo del reactor (SCRAM)
  - ❑ Núcleo: alto flujo neutrónico, brusca variación del flujo neutrónico .
  - ❑ Primario: disparo RCP,  $\Delta T$ , OT  $\Delta T$ , OP  $\Delta T$ , bajo caudal.
  - ❑ Presionador: alta presión, baja presión, alto nivel.
  - ❑ Generadores de vapor: bajo nivel, bajo caudal MFW.
  - ❑ Turbina: disparo de turbina.
  - ❑ Inyección de seguridad: actuación de SIS sin SCRAM previo.
  - ❑ Manual

# Sistema: Sistemas de Fluidos

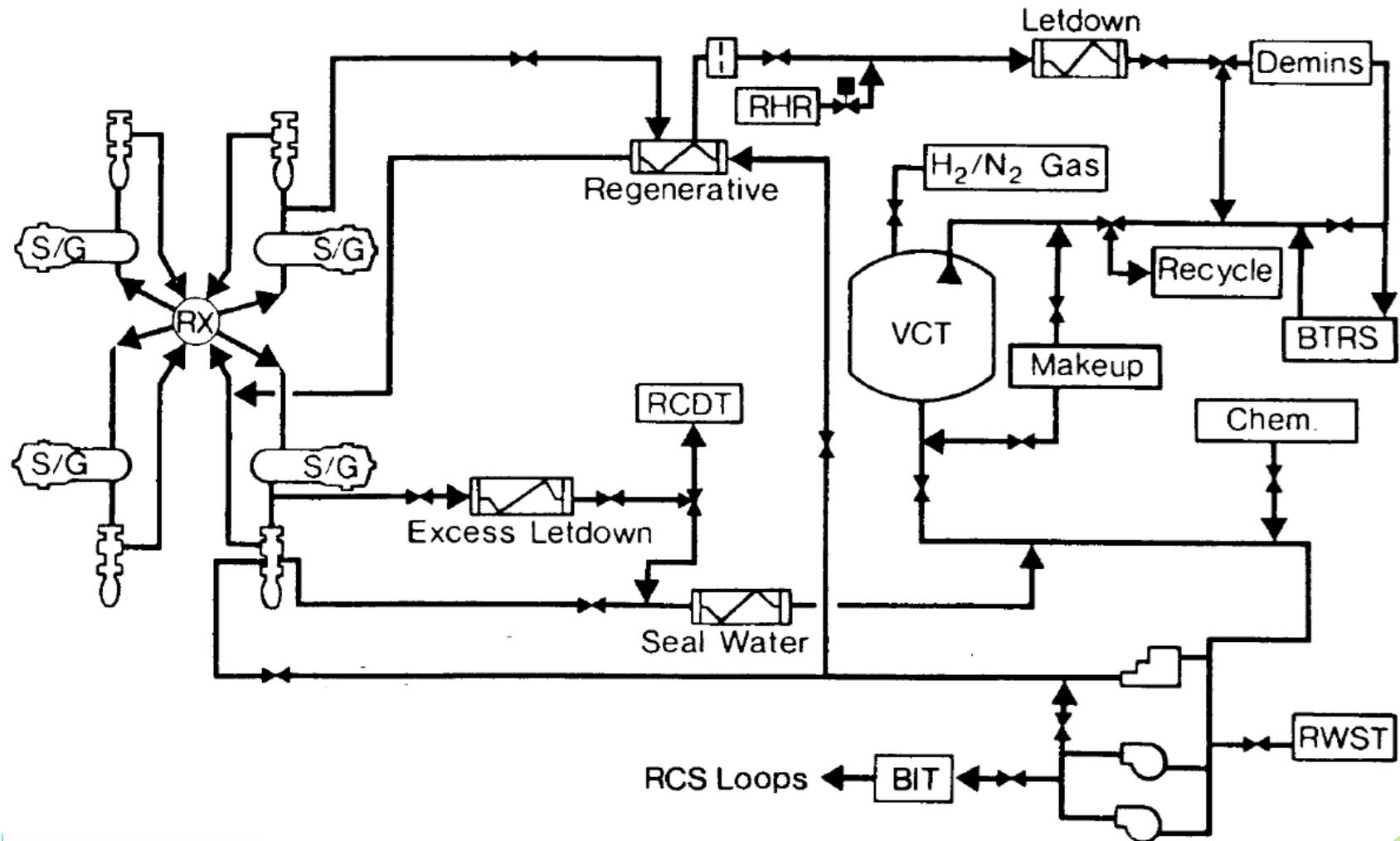


# Sistema: Sistemas de Fluidos

---

- Control químico y volumétrico
- Evacuación de calor residual
- Reciclado de boro

# Sistema: Control Químico y Volumétrico

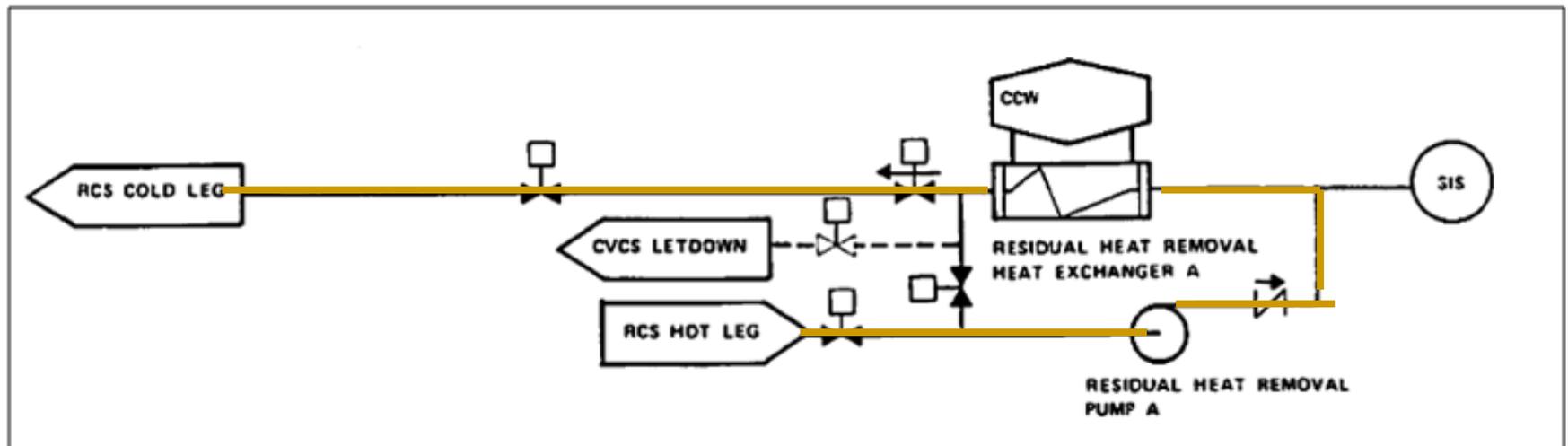


# Sistema: Control Químico y Volumétrico

---

- ❑ Mantiene el nivel de agua en el presionador.
- ❑ Mantiene el inventario de agua del SRR
- ❑ Mantiene el caudal de inyección de agua de sellado de las bombas de refrigeración
- ❑ Controla las condiciones químicas del agua, el nivel de actividad y la concentración de boro (Cb).
- ❑ Sirve para el llenado, drenaje y prueba de presión del SRR.
- ❑ Efectúa la purificación del agua de refrigeración, durante las paradas y durante las recargas.

# Sistema: Sistema de Evacuación del Calor Residual



# Sistema: Sistema de Evacuación del Calor Residual

---

- ❑ La función principal es **disipar el calor del núcleo** y el del SRR durante las **paradas de la central** y las recargas de combustible.
- ❑ Una parte del sistema funciona conjuntamente con el SIS en situaciones de emergencia.
- ❑ Consta de dos o tres trenes , según el nivel de potencia térmica , que llevan cada uno: intercambiadores de calor, bombas de circulación, válvulas y controles.
- ❑ Se pone en funcionamiento cuando después de una parada se alcanza una T de  $177^{\circ}\text{C}$  y  $28 \text{ kg/cm}^2$
- ❑ En los intercambiadores del RHRS circula agua a  $35^{\circ}\text{C}$  . El agua de refrigeración pasa por las carcassas de estos cambiadores y se alcanza una temperatura de  $65^{\circ}\text{C}$  en las 8 primeras horas Una bomba del SRR se mantiene en funcionamiento para asegurar el enfriamiento de la central hasta que se llega a los  $71^{\circ}\text{C}$

# Sistema: Sistema de Reciclado de Boro

---

- El objeto es procesar y reciclar agua borada así como reducir el contenido de los efluentes químicos y productos radiactivos.
- Las funciones básicas son:
  - a. Recoger efluentes borados radiactivos del SRR y de otras fuentes durante la operación.
  - b. Procesar el volumen de carga que se recoge durante un ciclo del combustible y absorber los excesos de caudal de agua.
  - c. Procesar el agua de reciclado hasta producir una disolución de boro al 4% con la química adecuada.

## 2 Transitorios

---

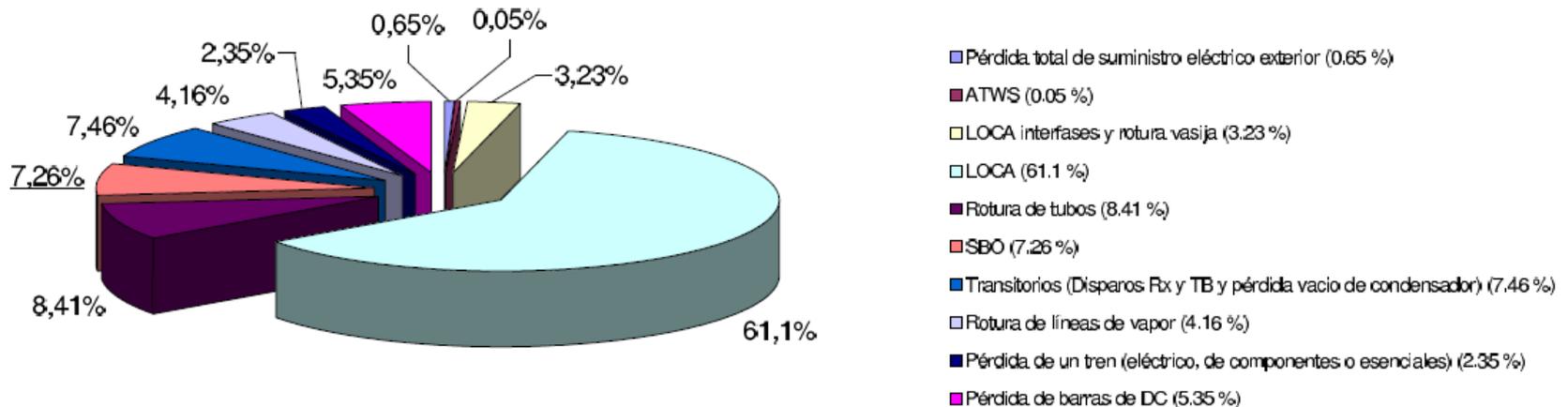
- ❑ **LBLOCA** (Large Break Loss of Coolant Accident)
- ❑ **SBLOCA** (Small Break Loss of Coolant Accident)
- ❑ **SBO** (Station Black Out)

---

# LBLOCA (Large Break Loss of Coolant Accident)

## 2 Transitorios: LBLOCA

### □ LBLOCA (Large Break Loss of Coolant Accident)



# LBLOCA: Evolución

LBLOCA	INYECCION ALTA PRESION HPIS	INYECCION ACUMULADORES	INYECCION BAJA PRESION LPIS	RECIRCULACION ALTA PRESION REC-HPIS	RECIRCULACION BAJA PRESION REC-LPIS	No	Comarq
	HPIS	ACCS	LPIS	REC-HPIS	REC-LPIS		
						1	OK
						2	OK
						3	DN
						4	OK
						5	DN
						6	DN*
						7	DN
						8	OK
						9	DN
						10	DN
						11	DN*
						12	DN
						13	DN

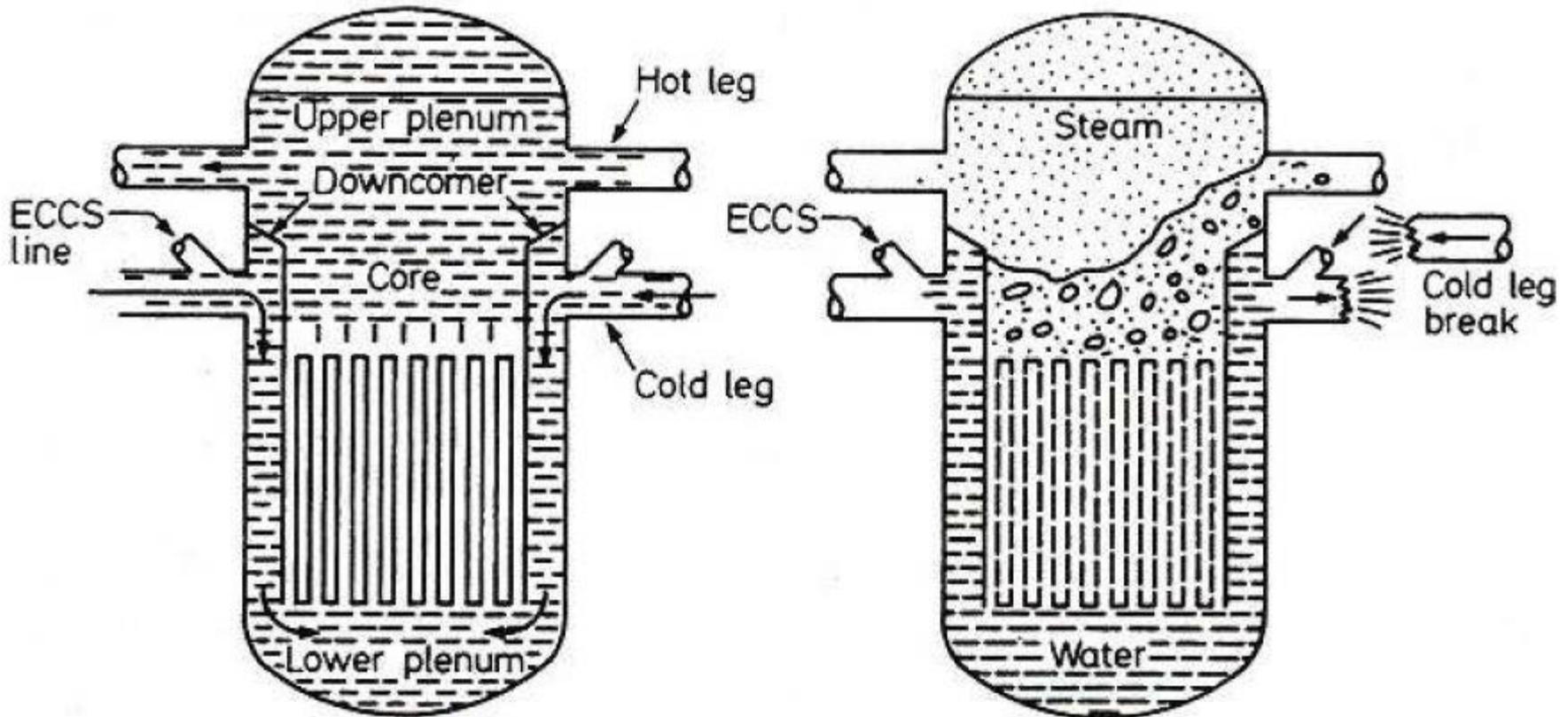
# LBLOCA: Fases

---

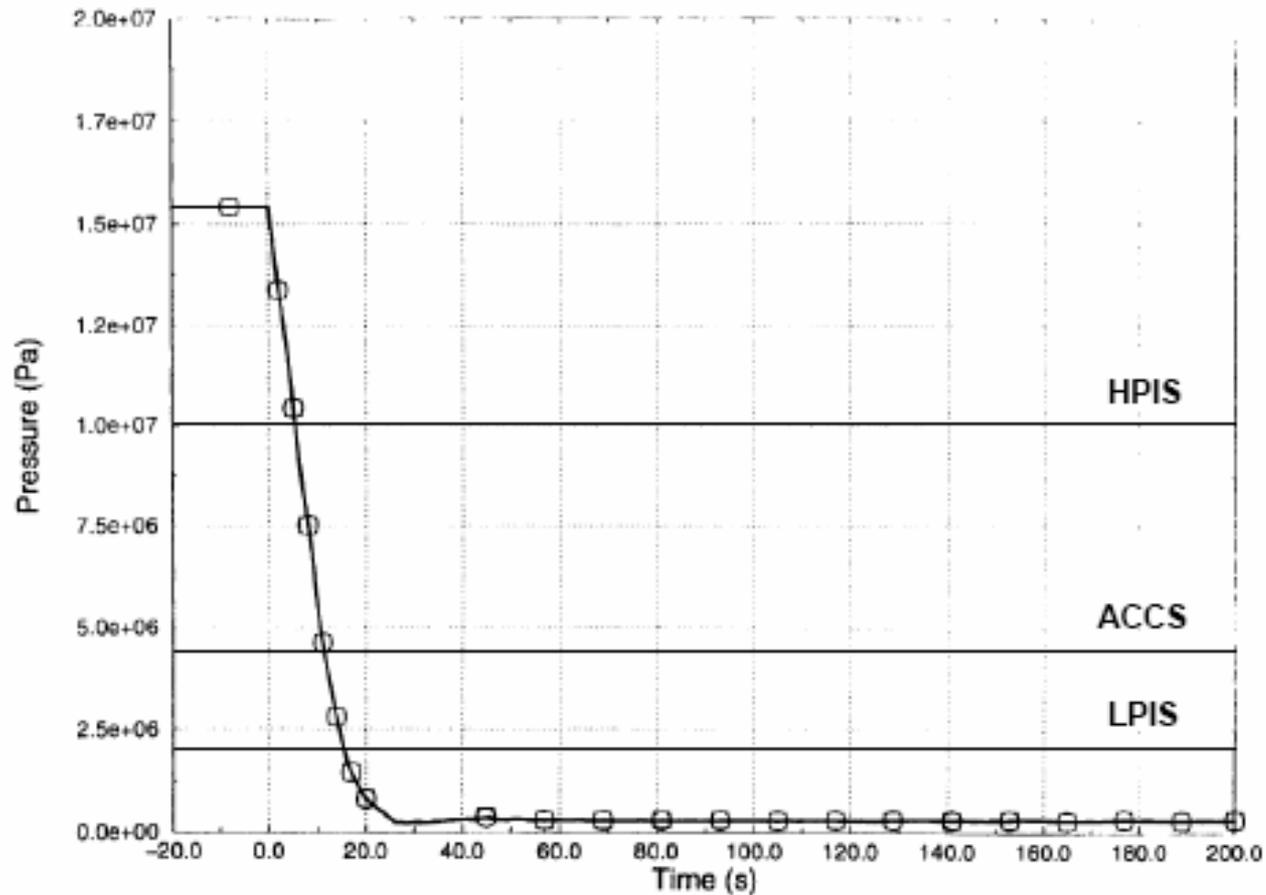
En los 2 ó 3 primeros minutos después de un LOCA hay cuatro fases:

1. **Blowdown**: el refrigerante sale del SRR.

# LBLOCA: Blowdown



# LBLOCA: Blowdown

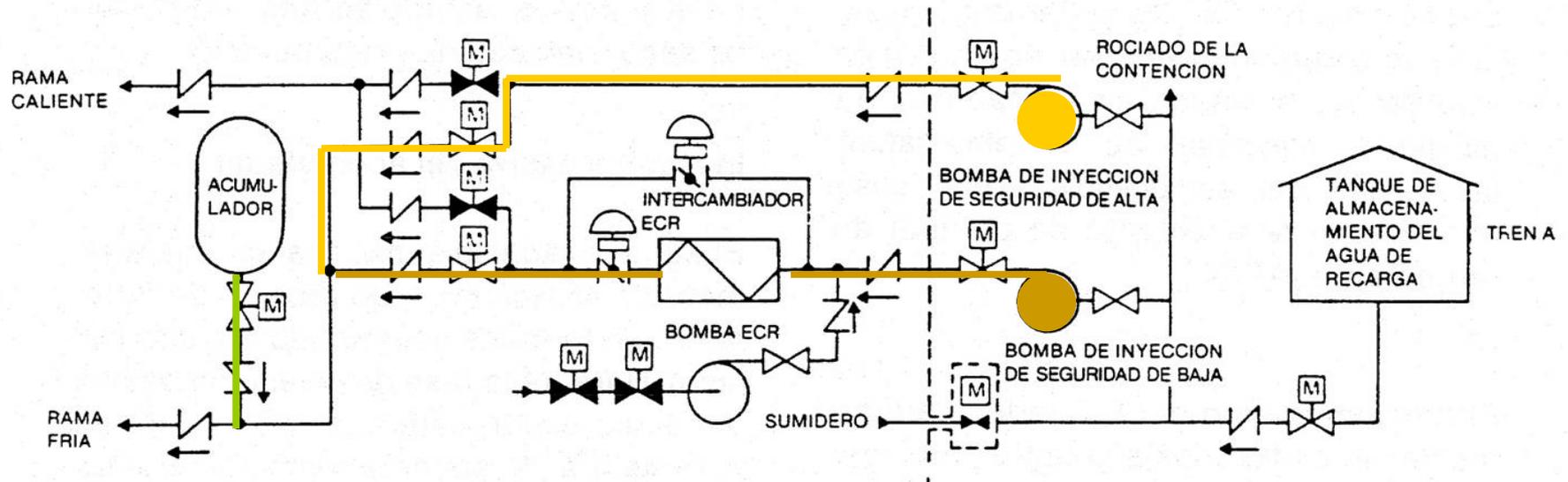


Ref: LBLOCA Analysis in a Westinghouse PWR 3 Loop Design Using RELAP5/MOD3, NUREG/IA-0195, J.I. Sánchez; C.A. Lage y T. Nuñez, ENUSA. NRC

# LBLOCA: Evolución

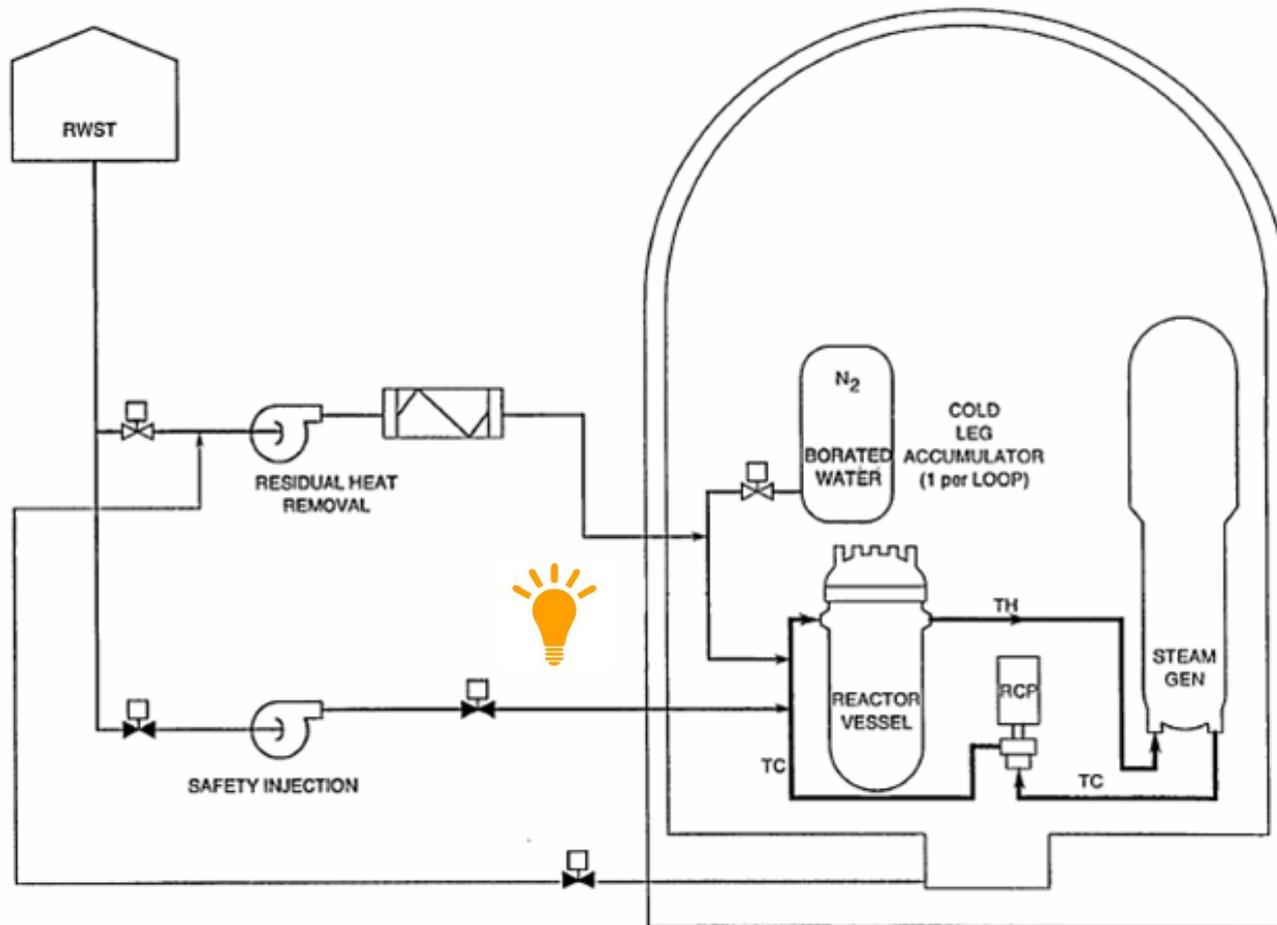
LBLOCA	INYECCION ALTA PRESION HPIS	INYECCION ACUMULADORES	INYECCION BAJA PRESION LPIS	RECIRCULACION ALTA PRESION	RECIRCULACION BAJA PRESION	No	Comarq
	HPIS	ACCS	LPIS	REC-HPIS	REC-LPIS		
						1	OK
						2	OK
						3	DN
						4	OK
						5	DN
						6	DN*
						7	DN
						8	OK
						9	DN
						10	DN
						11	DN*
						12	DN
						13	DN

# Sistema: Sistema de Inyección de Seguridad



- ❑ Sistema de inyección de seguridad (SIS)/ acumuladores (ACC)

# Sistema: Sistema de Inyección de Seguridad



- Sistema de inyección de seguridad (SIS)/ acumuladores (ACC)

# Sistema: Inyección de Seguridad Activa

- Esta fase se realiza mediante dos sistemas: **sistema de alta presión y sistema de baja presión.**
- El SIS inyecta agua borada en el SRR en **caso de roturas grandes y pequeñas**, que producirían una gran pérdida de agua.
- **El SIS** se compone de dos o tres trenes de inyección, que succionan agua del **tanque de almacenamiento del agua de recarga (TAAR)**. El agua borada de recarga se bombea a través de los intercambiadores de calor de evacuación del calor residual y de las líneas de inyección de alta presión a las ramas frías del SRR.
- La inyección activa se acciona en los siguientes casos:
  - a. **Detección de baja presión en el presionador (2/3 canales de instrumentación)**
  - b. **Aumento de presión en la contención (2/4 canales)**
  - c. **Enfriamiento excesivo del refrigerante (2/3 canales)**
  - d. **Enfriamiento excesivo detectado por medidores de presión en una de las líneas de vapor.**

# Sistema:

## Inyección pasiva de los acumuladores

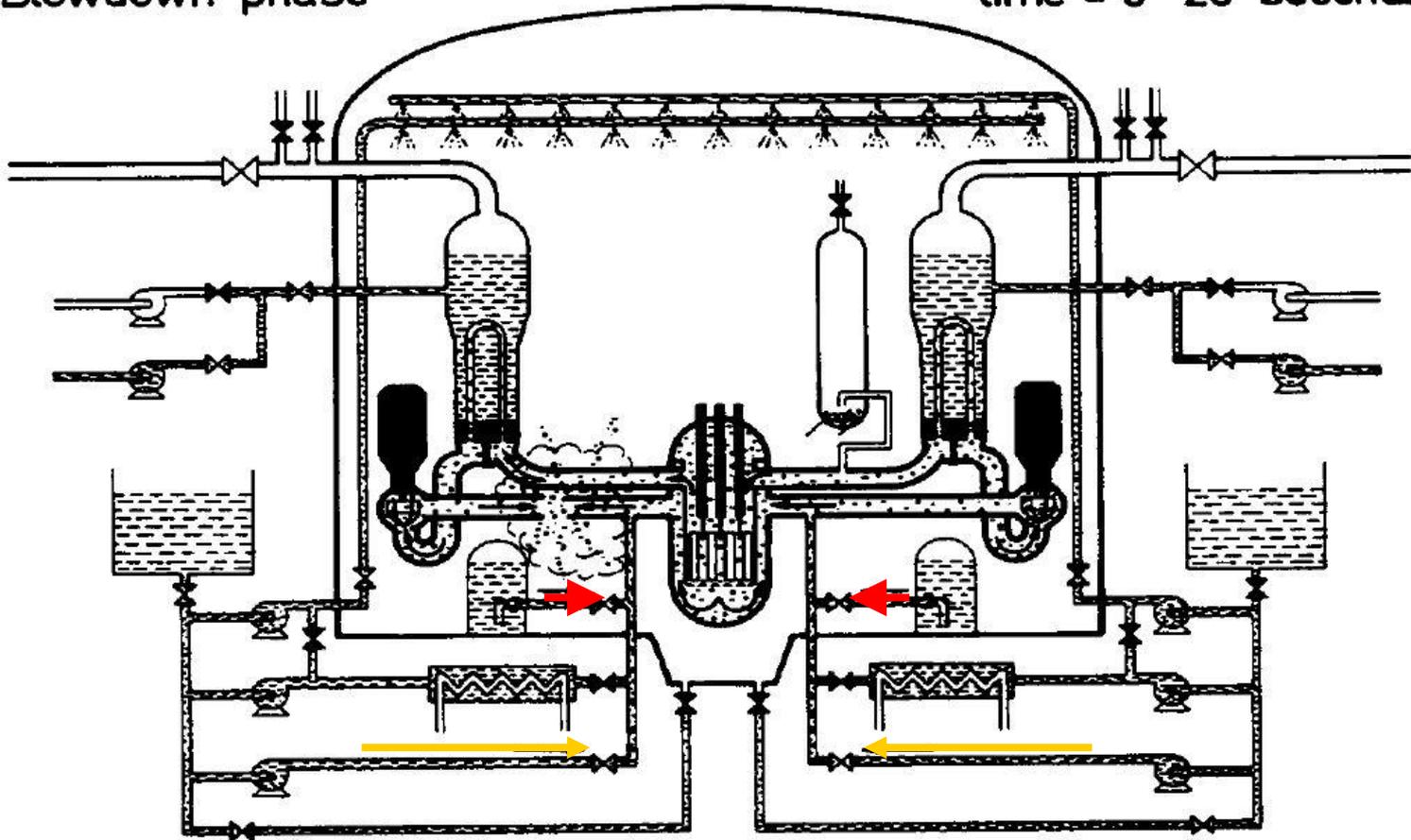
---

- ❑ El agua borada está almacenada a unos  $45 \text{ kg/cm}^2$  , bajo presión de nitrógeno, en tanques acumuladores ( uno por lazo).
- ❑ En esta fase, **el agua se inyecta en la rama fría del SRR**, El contenido de los acumuladores se descarga automáticamente cuando la despresurización del SRR provoca una inversión en la presión a través de las válvulas de retención de la tubería de inyección del acumulador.
- ❑ **Los acumuladores proporcionan un enfriamiento rápido del núcleo cuando se producen grandes roturas**

# Transitorios: LBLOCA

Blowdown phase

time = 0 - 20 seconds



# Transitorios: LBLOCA

---

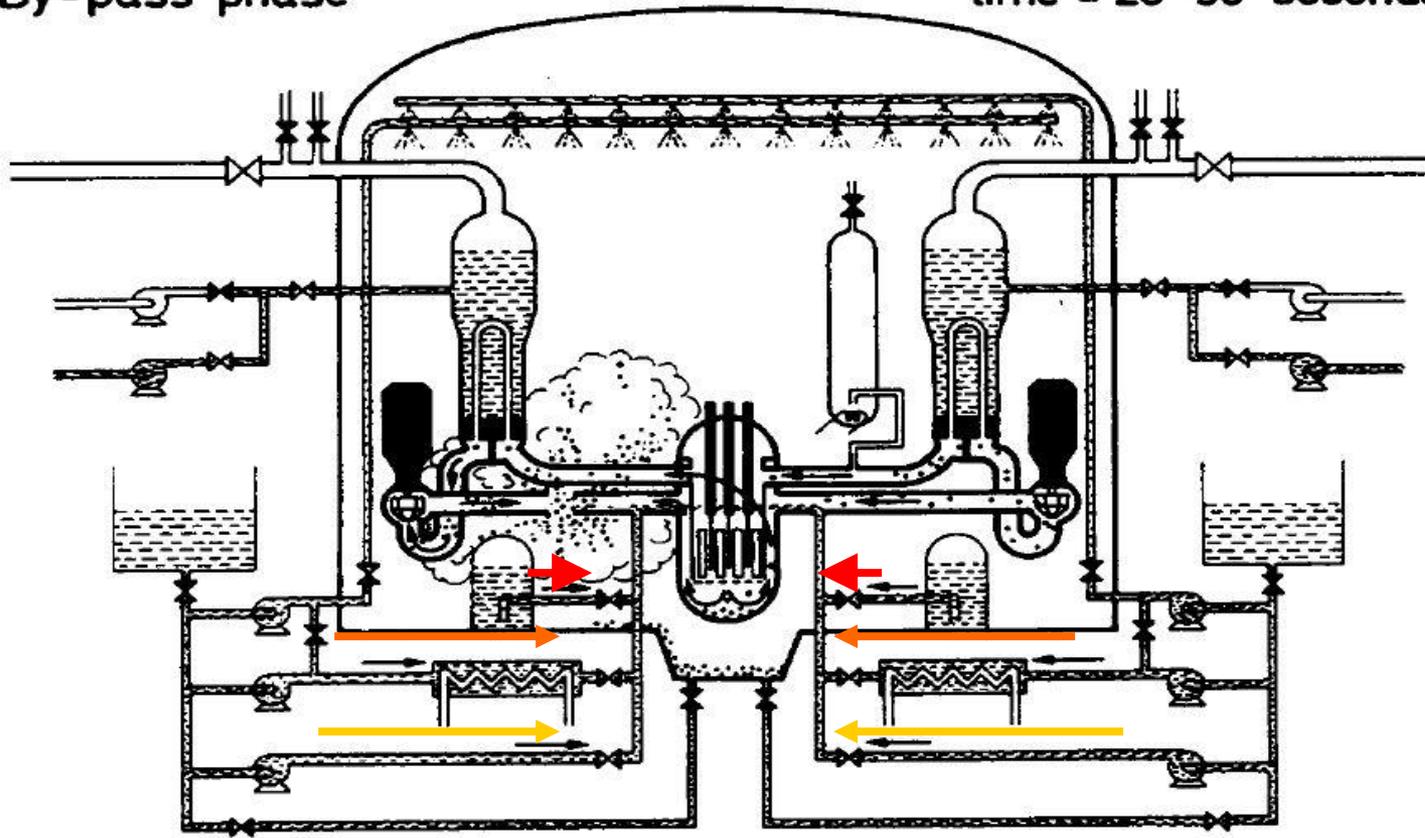
En los 2 ó 3 primeros minutos después de un LOCA hay cuatro fases:

1. **Blowdown**: el refrigerante sale del SRR.
2. **Bypass**: cuando el vapor ascendiente del downcomer impide inyectar el agua de refrigeración en la parte inferior de la vasija

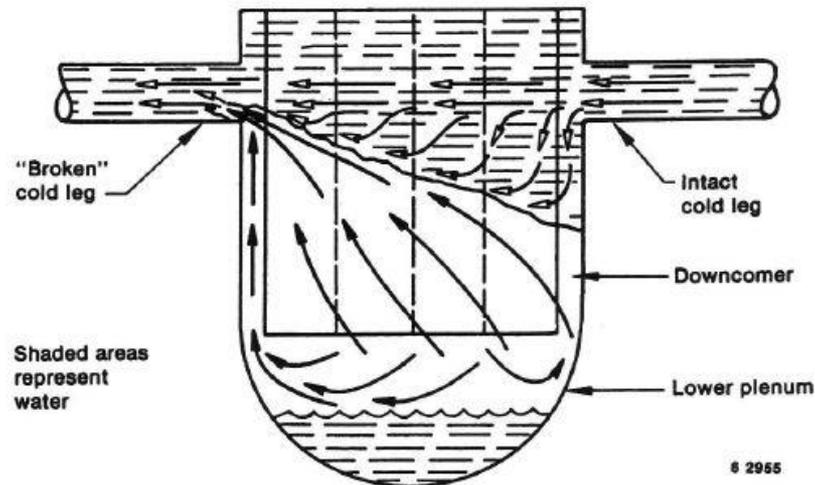
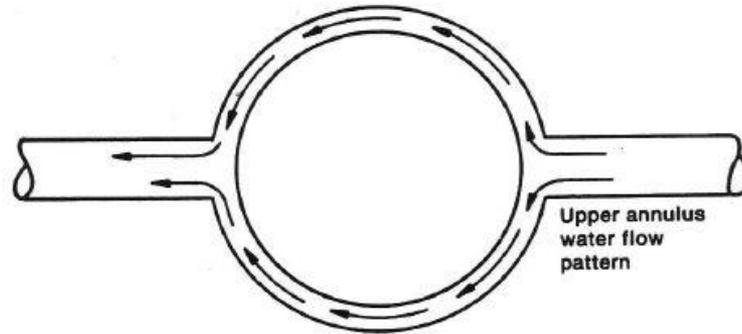
# LBLOCA: Bypass

By-pass phase

time = 20-30 seconds



# LBLOCA: Bypass



Idealized sketch of ECC bypass in a two-loop PWR.

# LBLOCA: Fases

---

En los 2 ó 3 primeros minutos después de un LOCA hay cuatro fases:

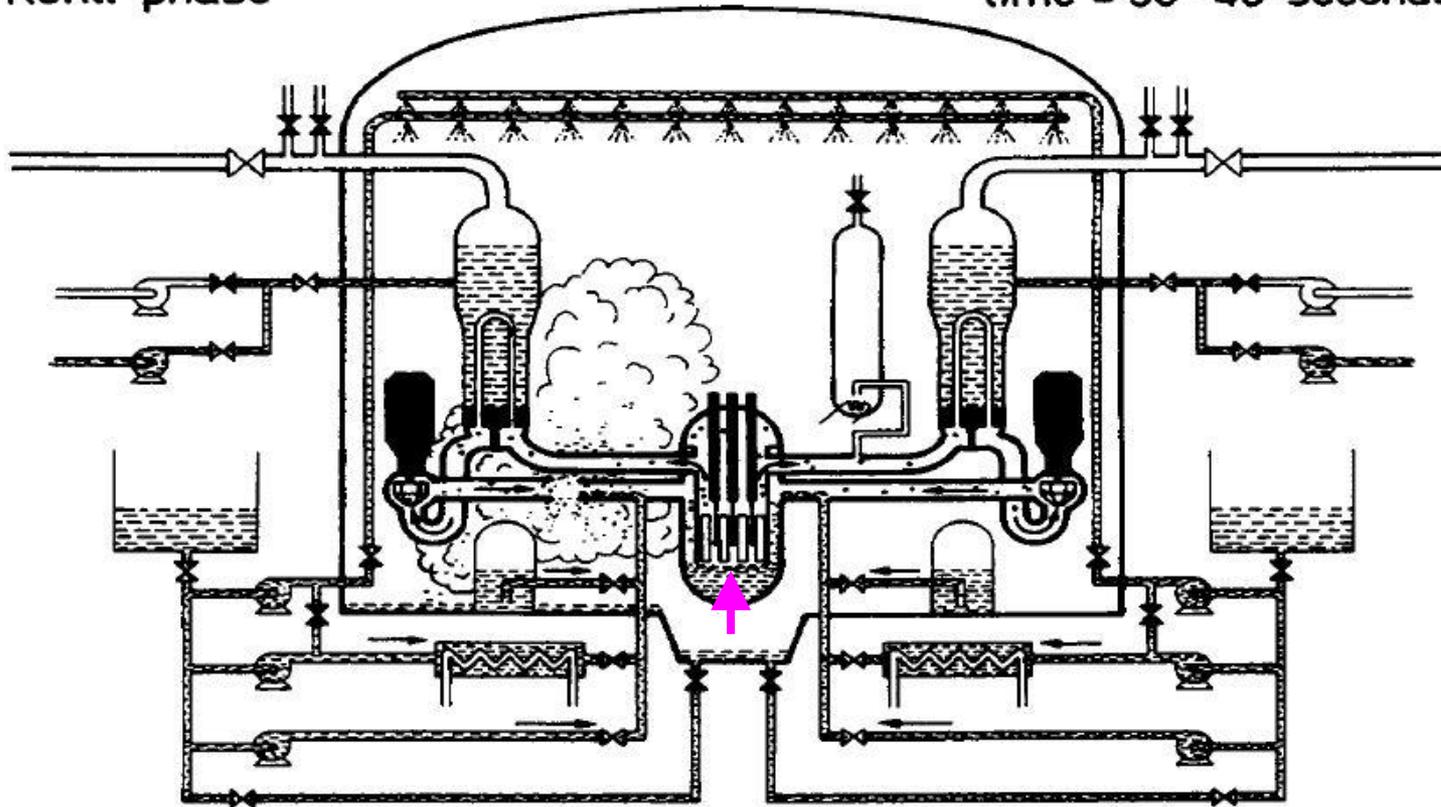
1. **Blowdown**: el refrigerante sale del SRR.
2. **Bypass**: cuando el vapor ascendiente del downcomer impide inyectar el agua de refrigeración en la parte inferior de la vasija
3. **Refill** : cuando el agua del sistema de refrigeración de emergencia comienza a llenar el reactor hasta cubrir la parte inferior de la vasija del reactor.
4. **Reflood**: cuando el refrigerante va subiendo el nivel del agua hasta que es lo suficientemente alto como para refrigerar el núcleo.



# LBLOCA: Refill

Refill phase

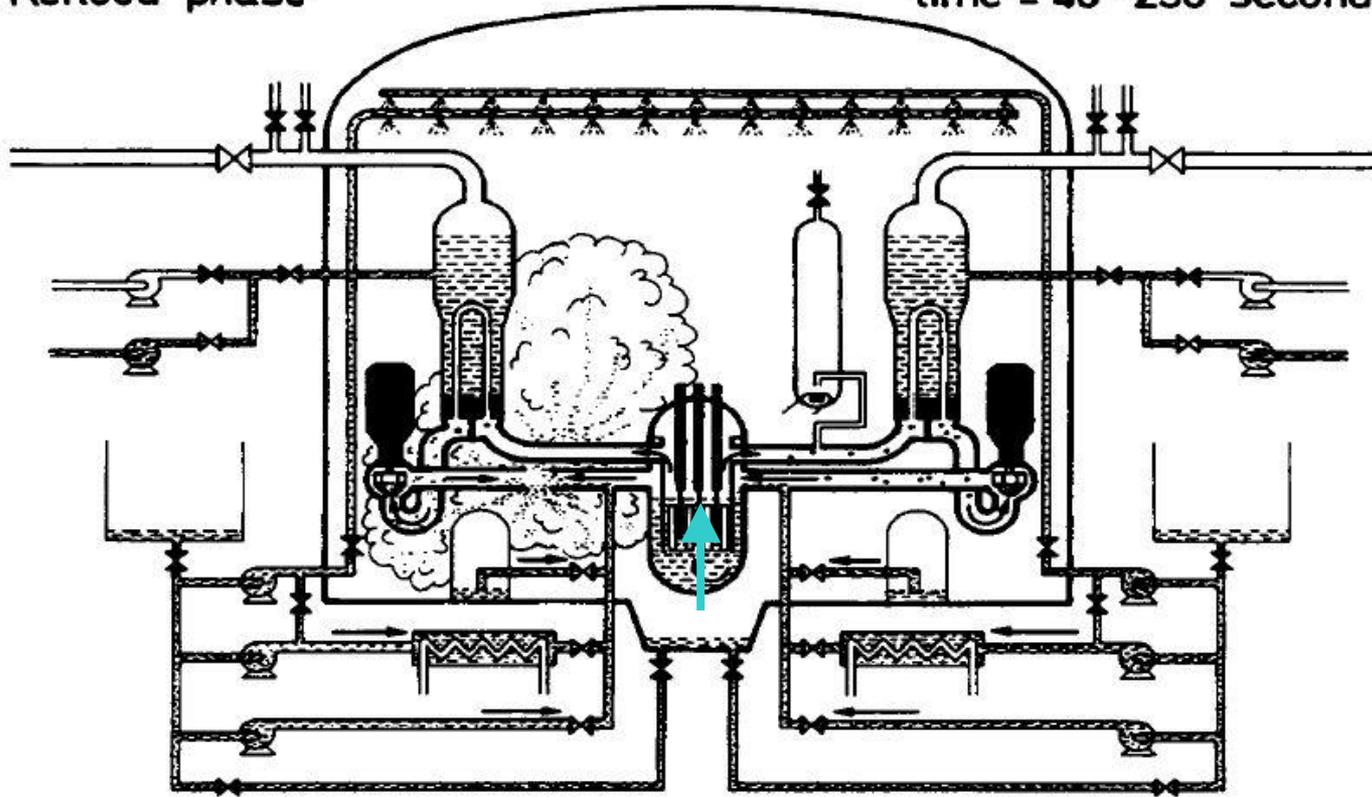
time = 30-40 seconds



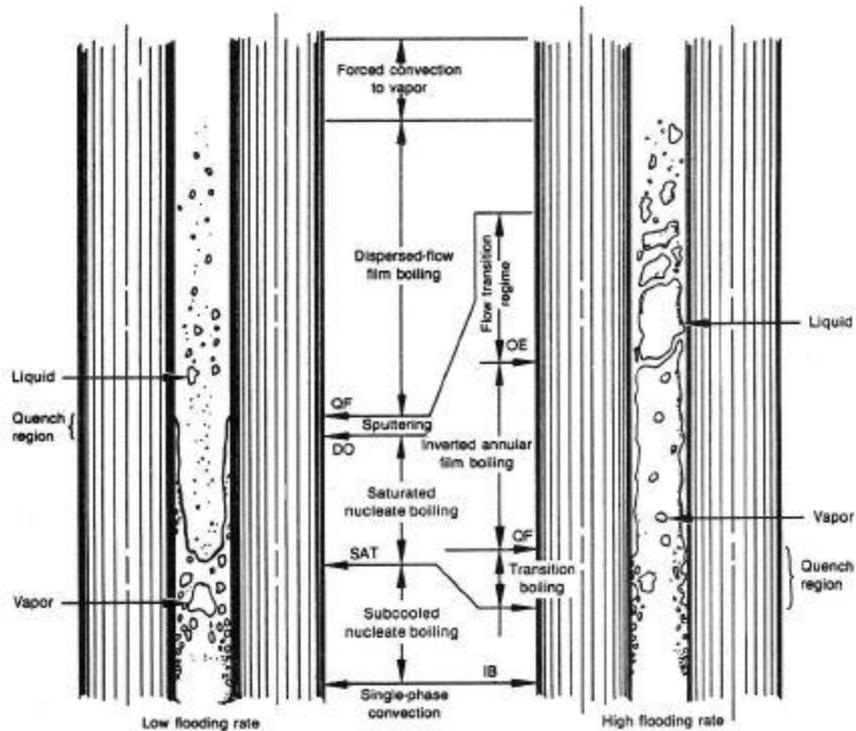
# LBLOCA: Reflood

Reflood phase

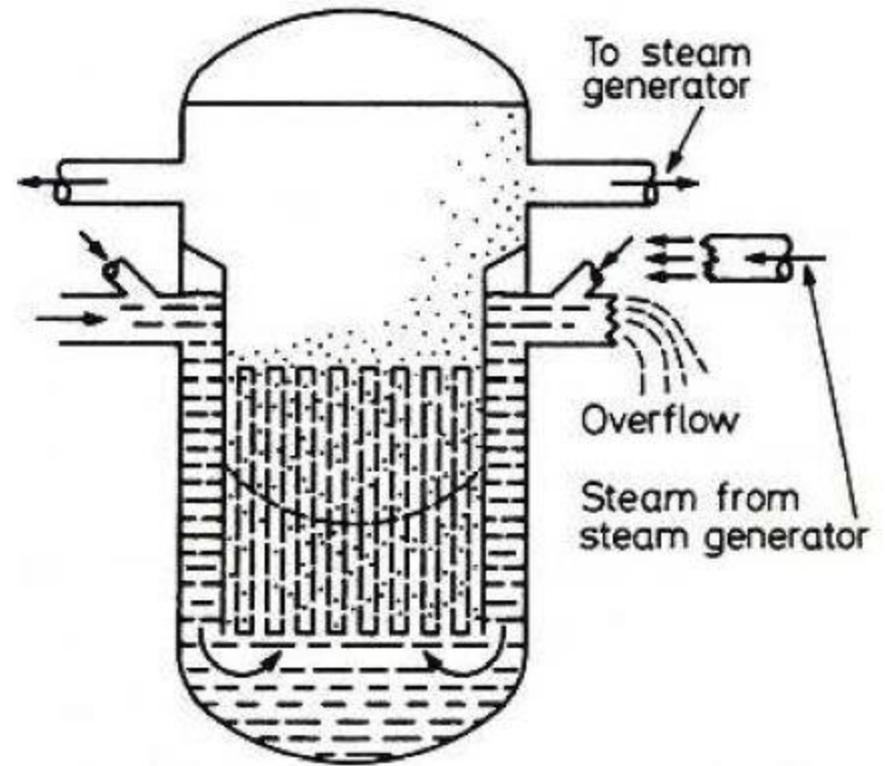
time = 40 - 250 seconds



# LBLOCA: Reflood



- DO Dryout
- OE Onset of entrainment
- IB Boiling Inception
- QF Quench front

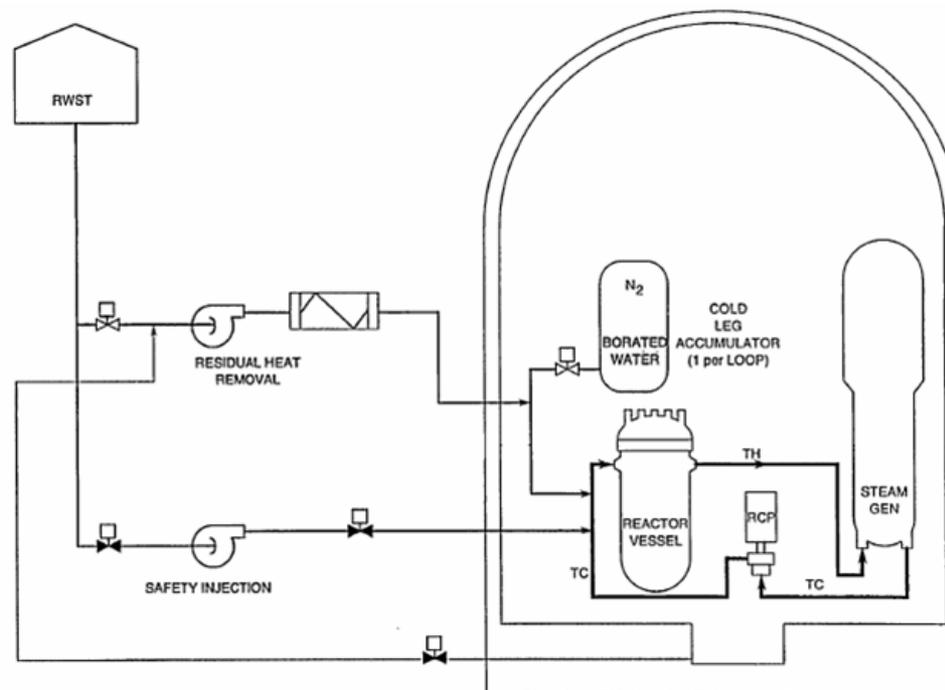


# LBLOCA: Evolución

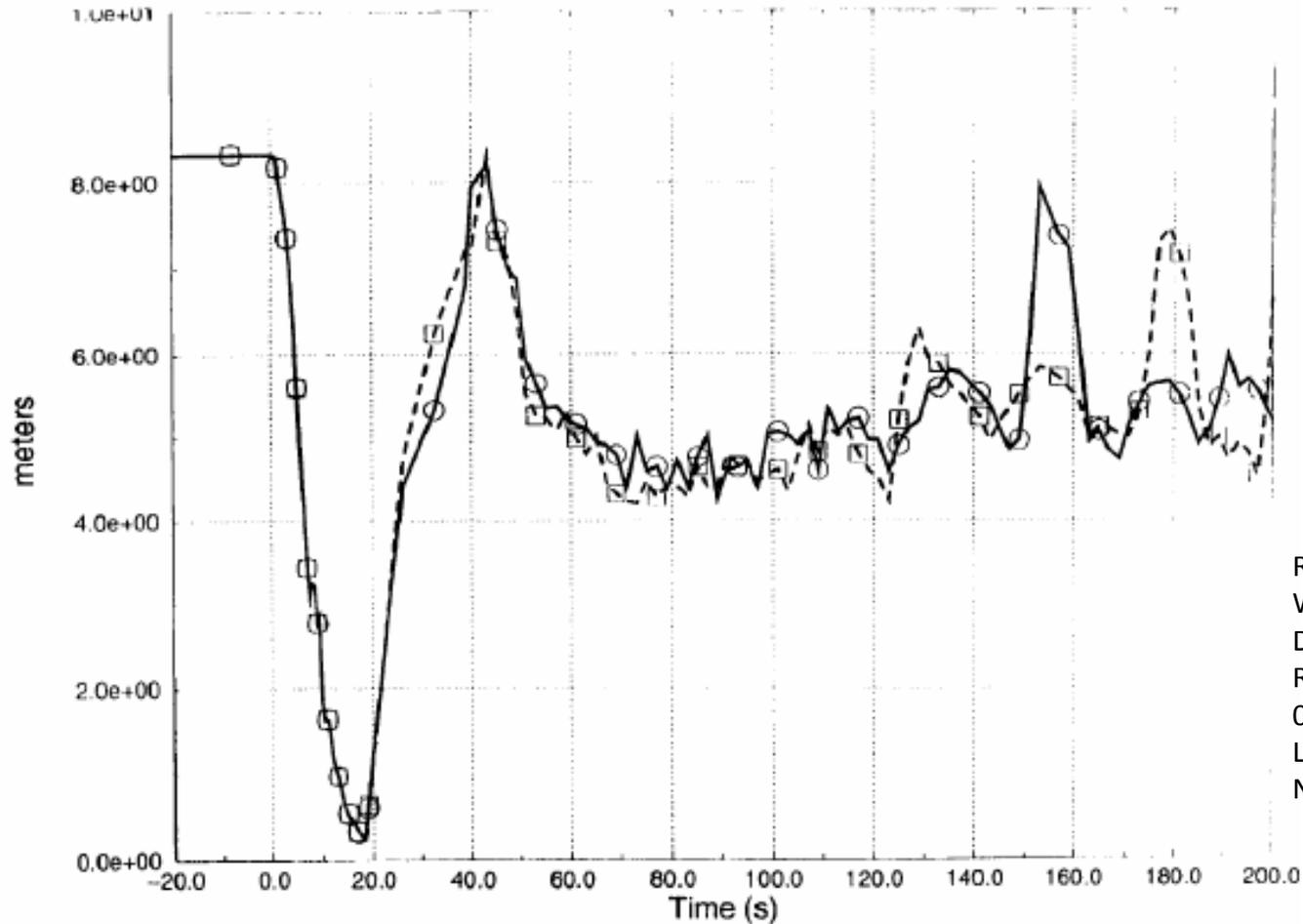
LBLOCA	INYECCION ALTA PRESION HPIS	INYECCION ACUMULADORES	INYECCION BAJA PRESION	RECIRCULACION ALTA PRESION	RECIRCULACION BAJA PRESION	No	Comarq
	HPIS	ACCS	LPIS	REC-HPIS	REC-LPIS		
						1	OK
						2	OK
						3	DN
						4	OK
						5	DN
						6	DN*
						7	DN
						8	OK
						9	DN
						10	DN
						11	DN*
						12	DN
						13	DN

# SIS: Recirculación

- La fase de inyección de seguridad termina cuando el nivel del agua en el TAAR baja de un cierto nivel. En ese momento las bombas no succionan del mismo sino del **sumidero del recinto de contención**.

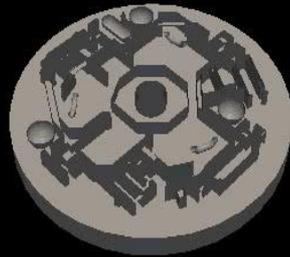
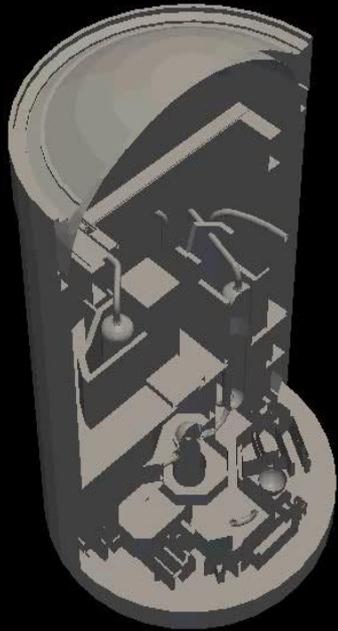


# LBLOCA: Reflood



Ref: LBLOCA Analysis in a Westinghouse PWR 3 Loop Design Using RELAP5/MOD3, NUREG/IA-0195, J.I. Sánchez; C.A. Lage y T. Nuñez, ENUSA. NRC

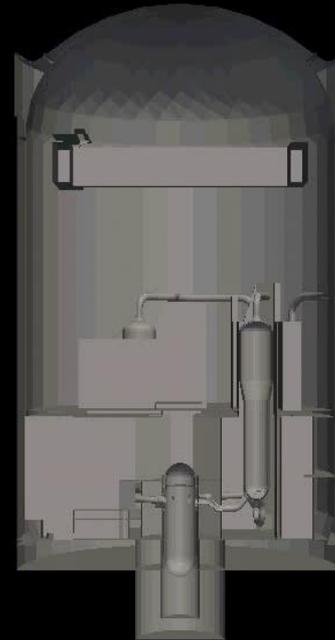
# LBLOCA: Reflood



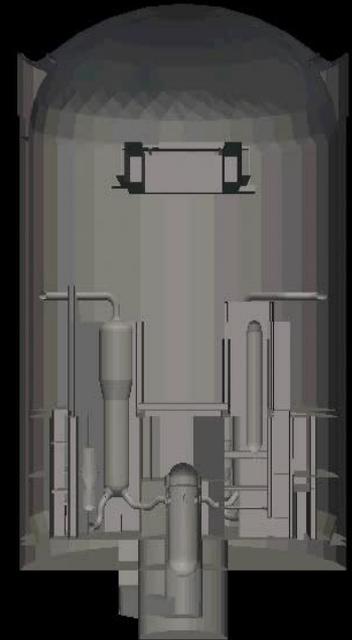
Cota 35



Cota 42



Seccion N-S



Seccion E-O

MkVlaMThm

Time: 0 s

Ref: ICONE 2015, nº 22-30445; Jiménez, Fernández-Cosials, Bocanegra, Queral, Montero.

# LBLOCA: Reflood



Ref: ICONE 2015, nº 22-30445; Jiménez, Fernández-Cosials, Bocanegra, Queral, Montero.

## 2 Transitorios: LBLOCA

---

- En el peor transitorio de LOCA se deben asegurar los siguientes parámetros:
  - Temperatura de vaina de combustible  $< 1204^{\circ}\text{C}$
  - Oxidación vaina  $< 17\%$  de espesor de la vaina.
  - Producción de hidrógeno  $< 1\%$  del total posible (si todo el zircaloy del núcleo se oxidase).
  - Geometría del núcleo intacta.
  - Se mantiene la capacidad de refrigeración a largo plazo del núcleo.

---

# SBLOCA (Small Break Loss of Coolant Accident)

## 2 Transitorios: SBLOCA

---

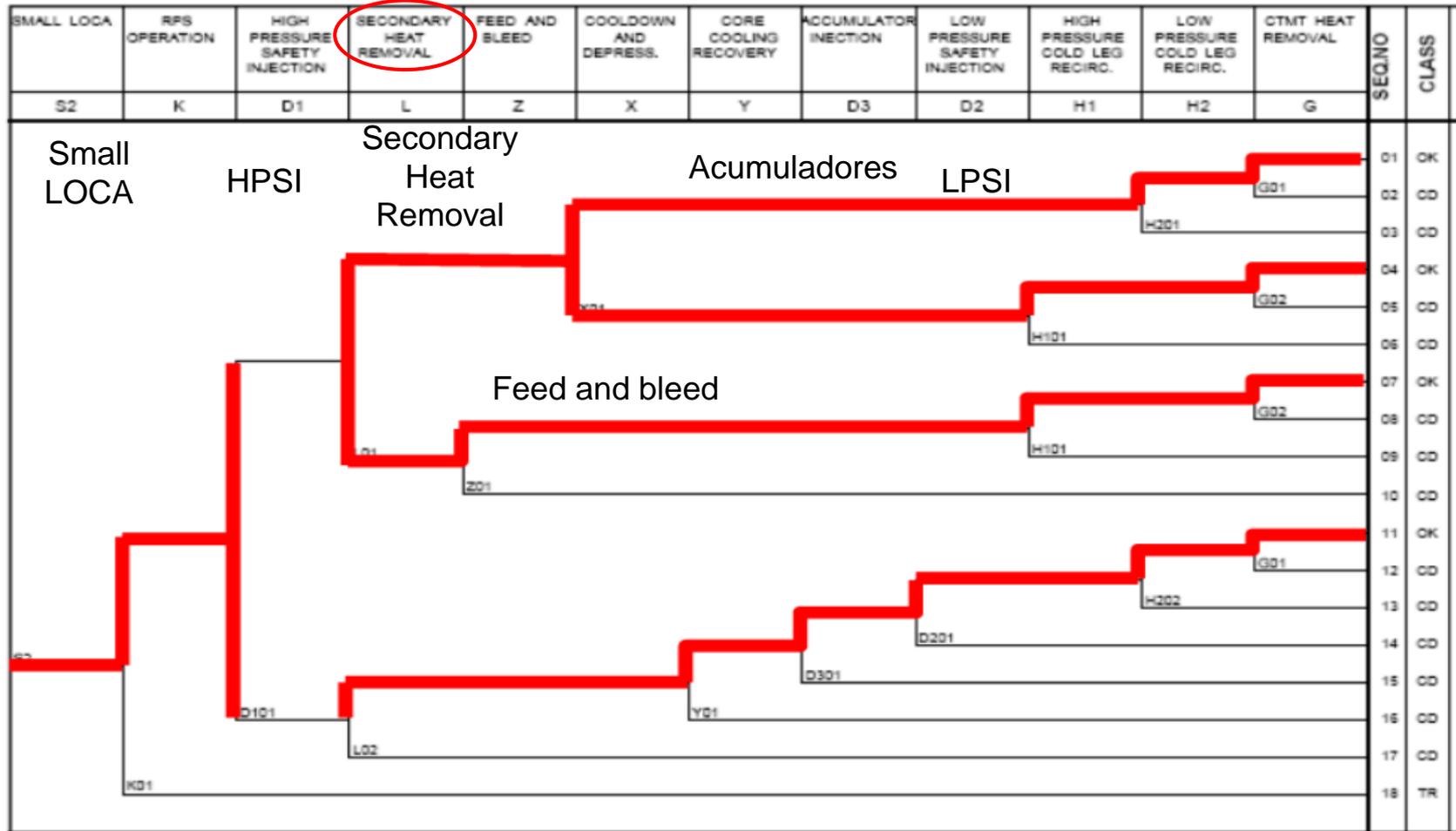
- ❑ En el SBLOCA la presión del SRR se queda estancada a un valor alto (80-90 bar) al no poder desalojar por la rotura más inventario.
- ❑ El operador puede tomar acciones para reducir el tiempo a alta presión haciendo estrategias de bajada de presión del SRR: despresurización del secundario para enfriar el primario y luego despresurización del primario con la ducha y las válvulas de alivio del presionador
- ❑ El objetivo es llegar lo antes posible a presión de inyección de los acumuladores (45 bar) y de la inyección de baja presión (14 bar)

## 2 Transitorios: SBLOCA

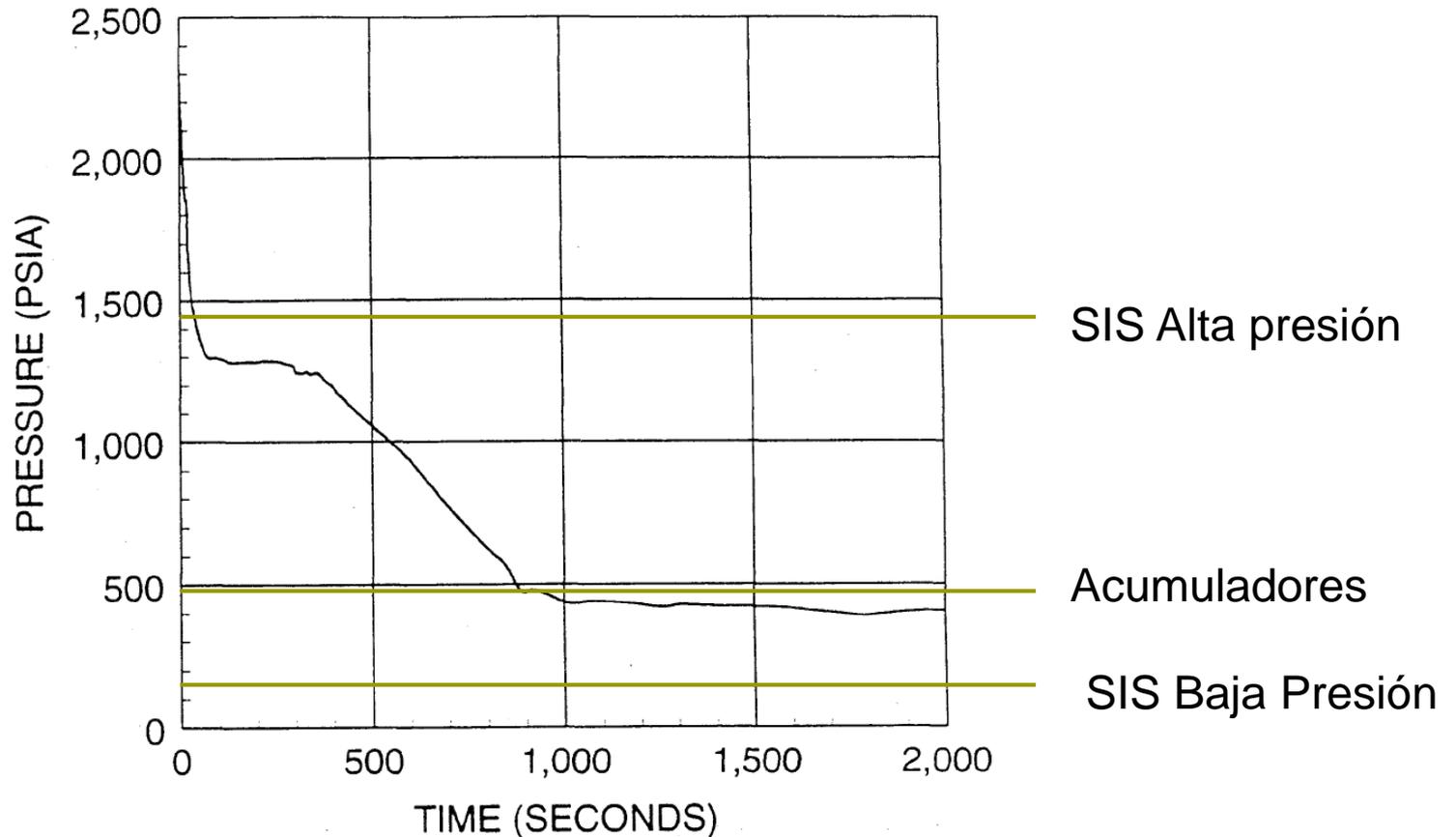
---



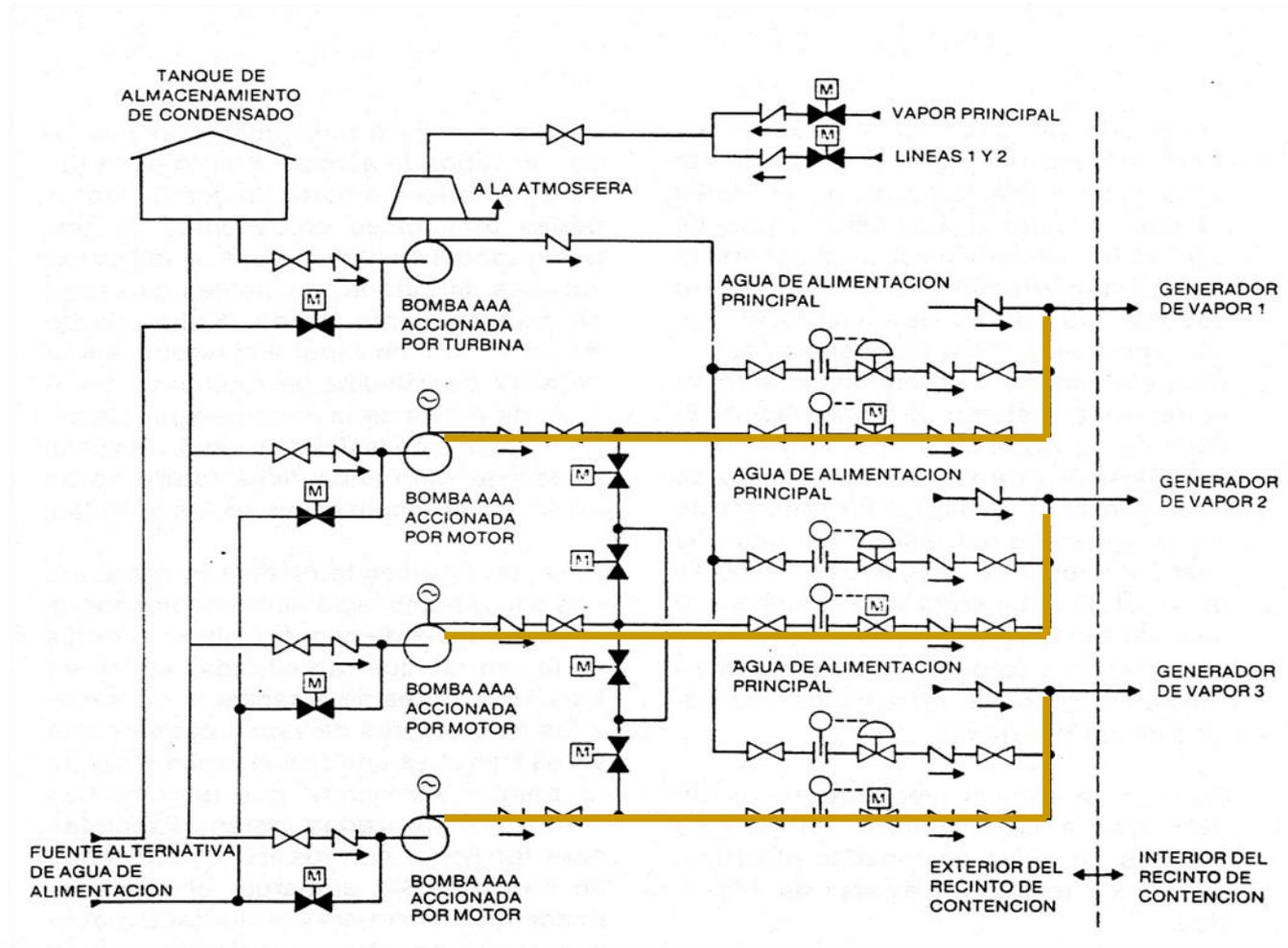
# SBLOCA: Evolución



# SBLOCA: Evolución



# 3 Sistemas de salvaguardias tecnológicas



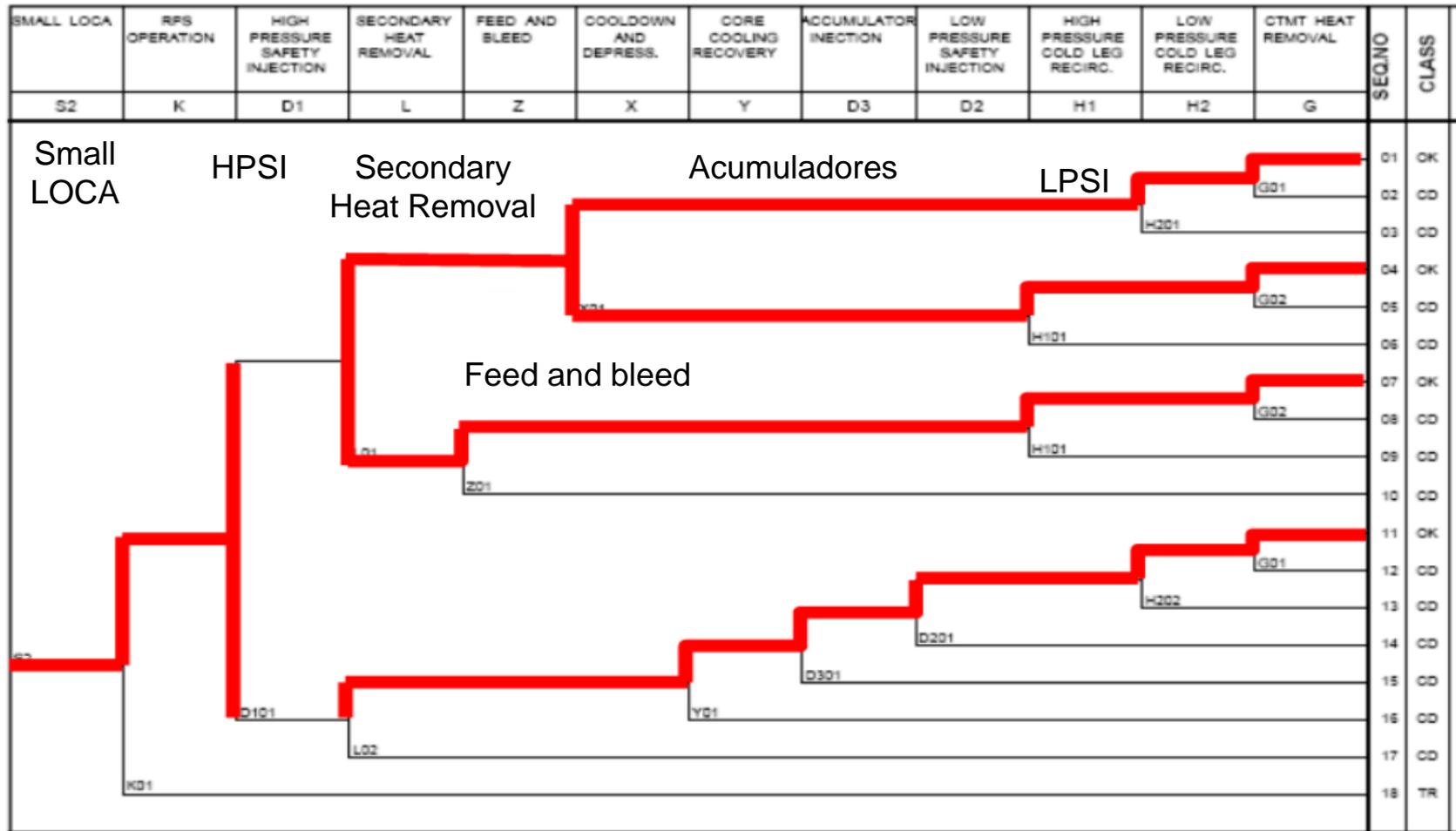
- Agua de alimentación auxiliar

# Sistema de agua de alimentación auxiliar (AFW)

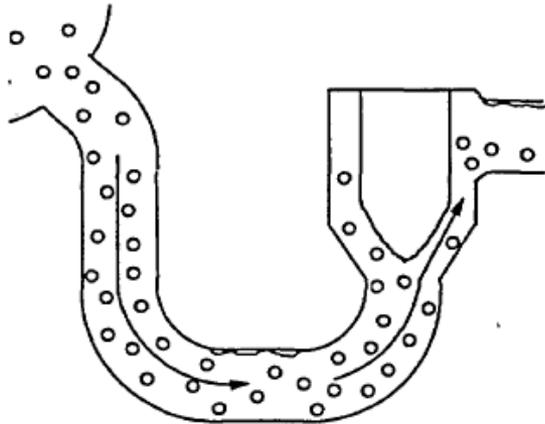
---

- ❑ Su función es proporcionar agua de refrigeración a los generadores de vapor, cuando el suministro normal de agua de alimentación a dichos generadores se interrumpe debido a:
  1. Paro de todas las bombas de alimentación por una pérdida de corriente eléctrica
  2. Funcionamiento incorrecto del sistema de alimentación
- ❑ Enfría el núcleo evitando la sobrepresión del sistema de refrigeración del reactor, y descubrimiento del núcleo por descenso del nivel de agua de la vasija, hasta que se alcanzan las condiciones que permiten entrar al SECR.
- ❑ El calor se elimina mediante liberación del vapor a la atmósfera a través de válvulas de alivio accionadas eléctricamente, o por válvulas de seguridad.
- ❑ El AFW mantiene el inventario de agua de los GV.

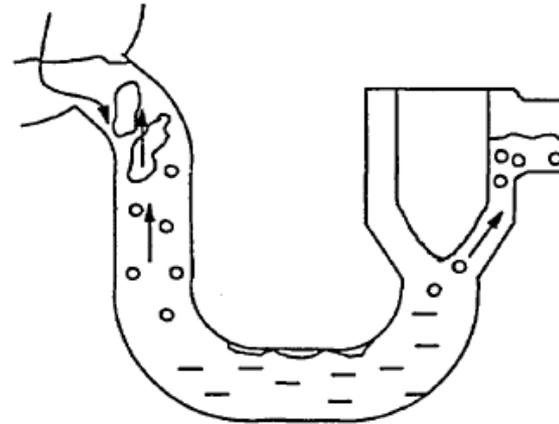
# SBLOCA: Evolución



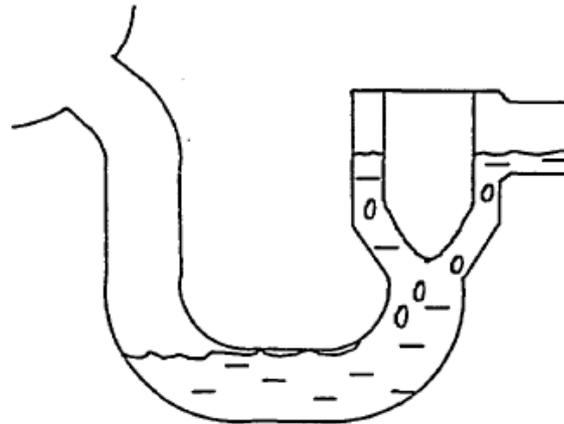
# SBLOCA: Sello del Lazo



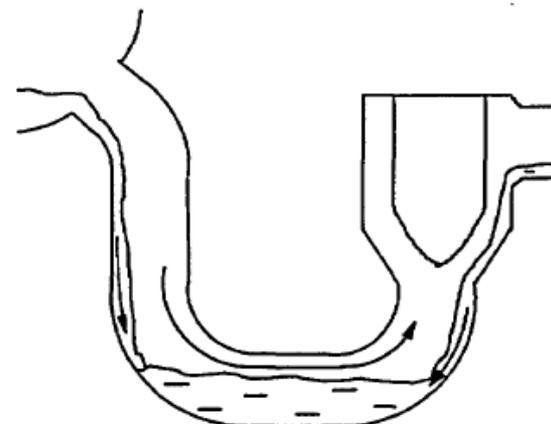
a) Initial Phase: Natural Circulation



b) Natural Circulation Broken; Phase Separation



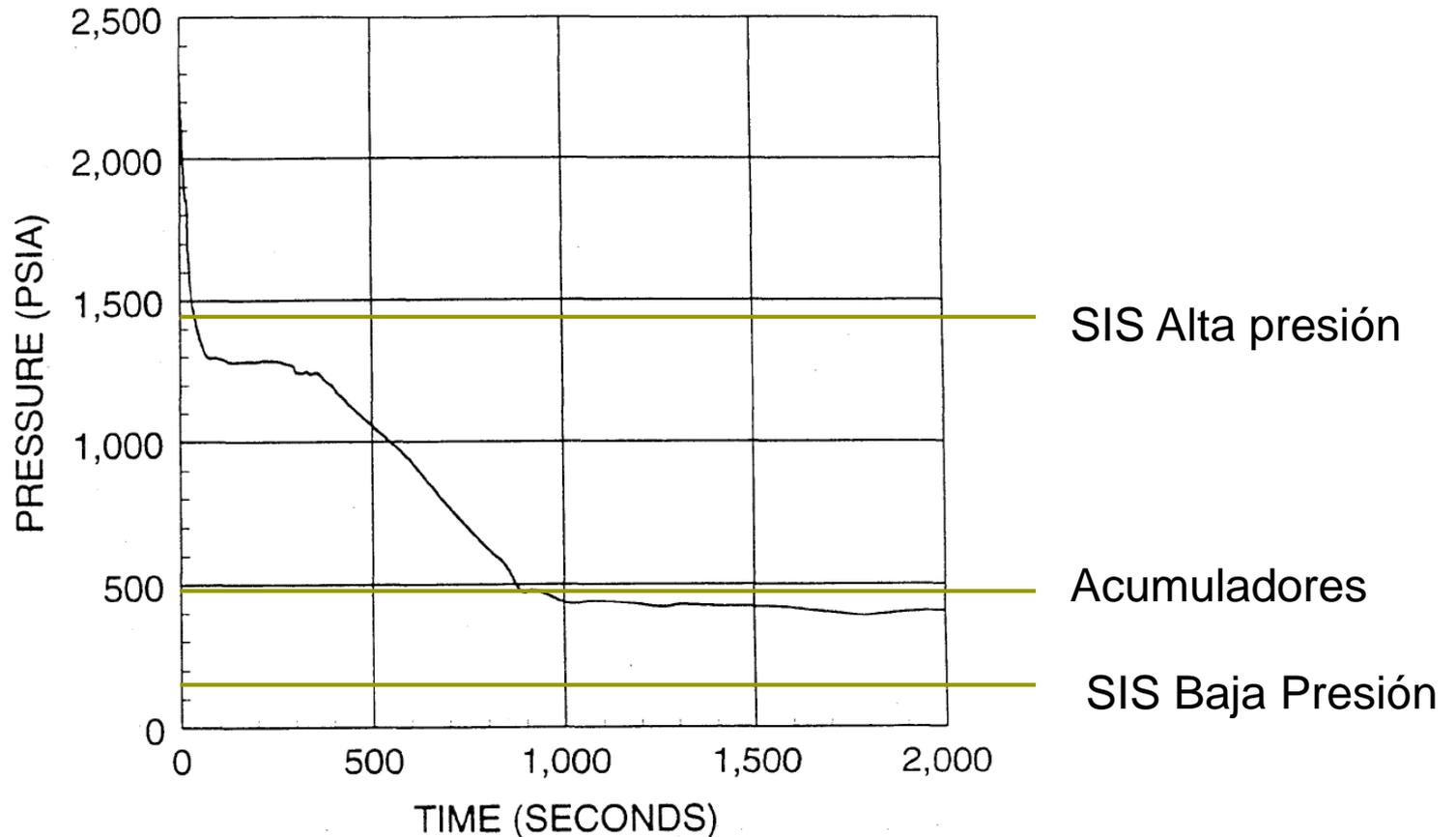
c) Loop Seal Clearing



d) Loop Seal Refilling

## Sello del lazo

# SBLOCA: Evolución



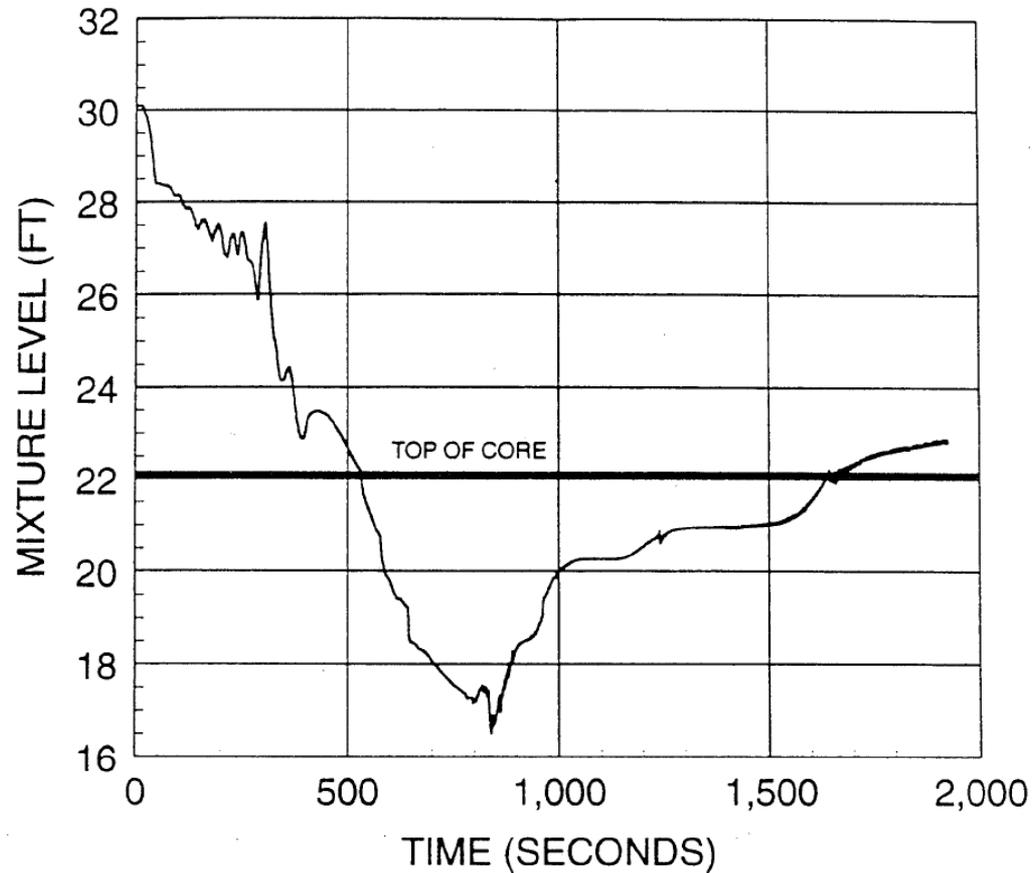
# SBLOCA: Evolución

## SMALL BREAK LOCA ANALYSIS

### TIME SEQUENCE OF EVENTS

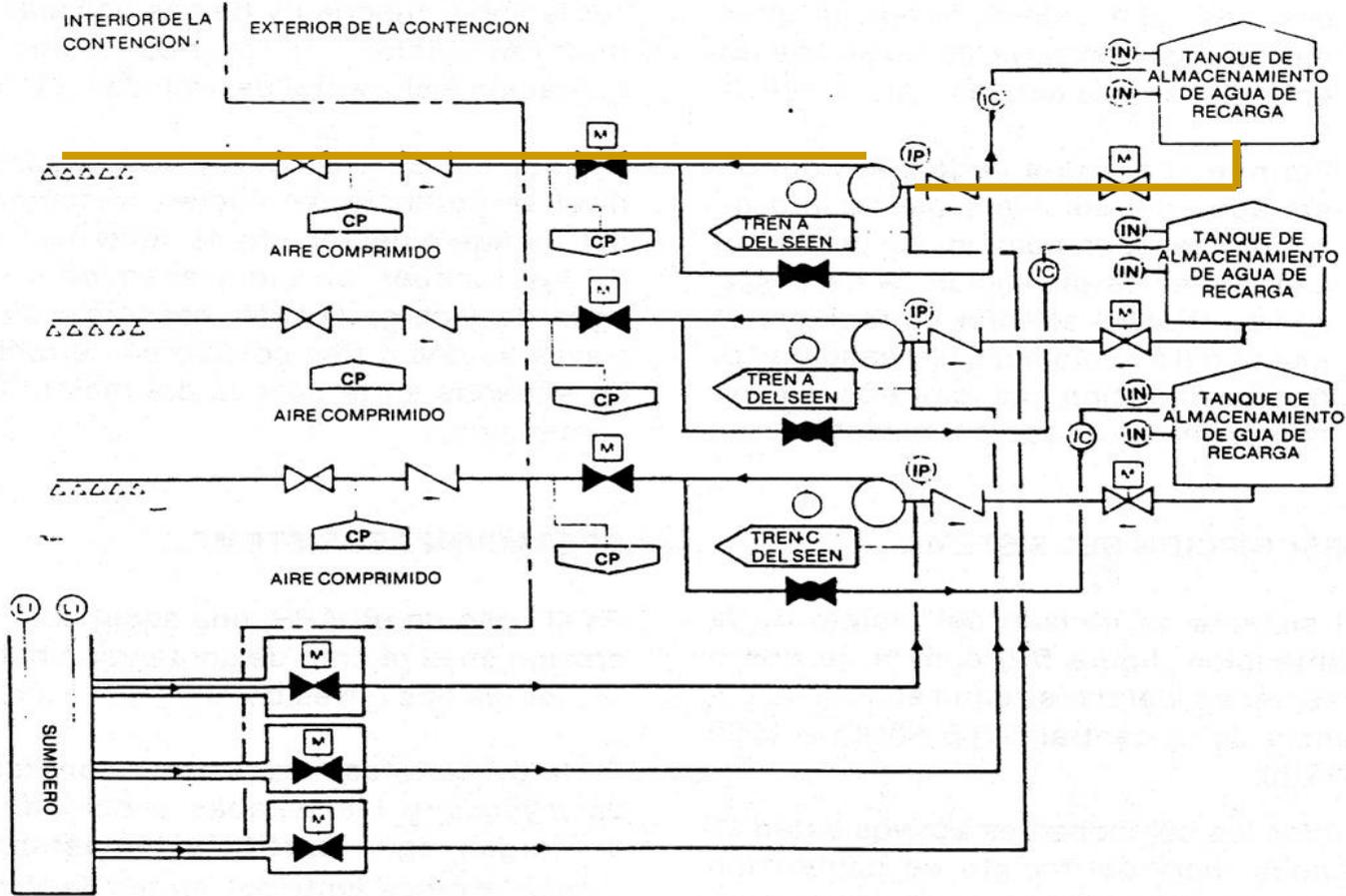
Event	Time (seconds)			
	Break Size:	<u>3 Inch</u>	<u>4 Inch</u>	<u>6 Inch</u>
Break Initiation		0.0	0.0	0.0
Reactor trip signal		20.7	11.9	6.4
Safety injection signal		30.2	20.5	13.1
Top of core uncover		985	535	289
Accumulator injection begins		2197	816	375
Peak cladding temperature occurs		1733	956	444
Top of core recovered		2618	1734	477

# SBLOCA: Evolución



# Sistema:

## Sistema de Rociado del Spray



- Sistema de rociado del spray

# Sistema: Sistema de aislamiento, rociado y refrigeración de la contención

---

El sistema de rociado del recinto de contención cumple las siguientes funciones de seguridad:

- a. **Reduce la presión del recinto de contención** por evacuación de calor, después de un LOCA. Se realiza mediante el rociado de agua borada.
- b. **Reduce la cantidad de yodo en el recinto de contención** y las posibles emisiones radiactivas al exterior, después de un LOCA
- c. **Permite el ajuste del pH del agua del sumidero del recinto de contención**, reduciendo el riesgo de corrosión por cloruros en los componentes del acero.

---

# SBO (Station BlackOut)

## 2 Transitorios: SBO

---

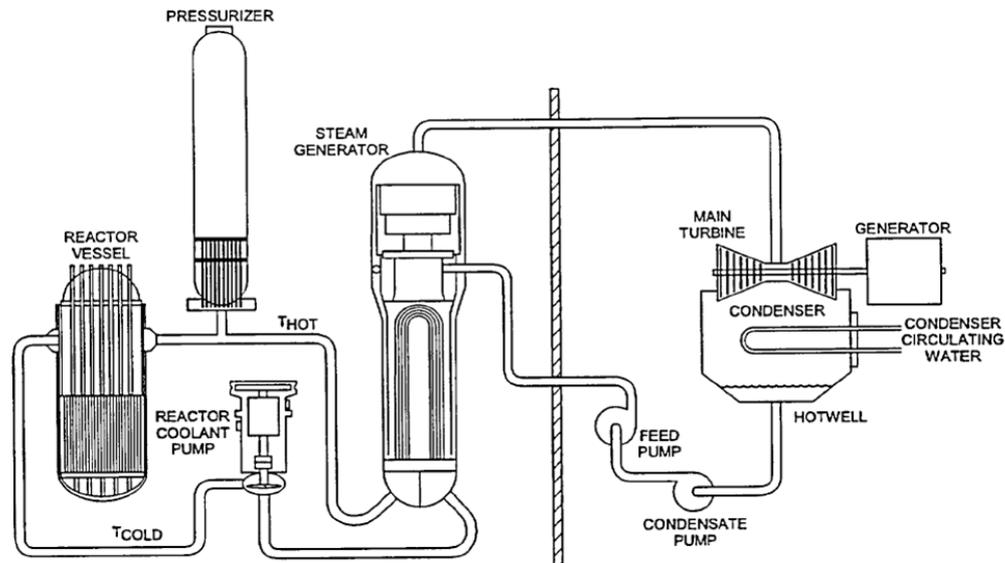


## 2 Transitorios: SBO

### Diseño original:

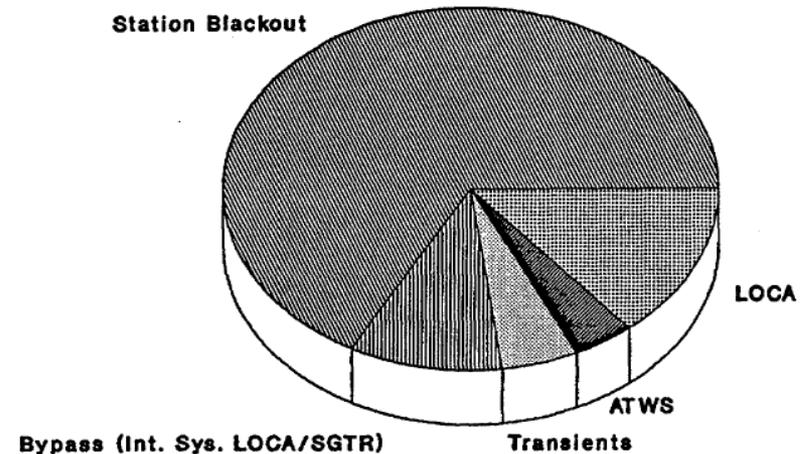
- Dos circuitos independientes de suministro eléctrico exterior (mínimo)
- Dos generadores diesel 1E

**Legalmente, SBO supone perder todas las fuentes de CA (salvo la suministrada de baterías por inversores)**



## 2 Transitorios: SBO

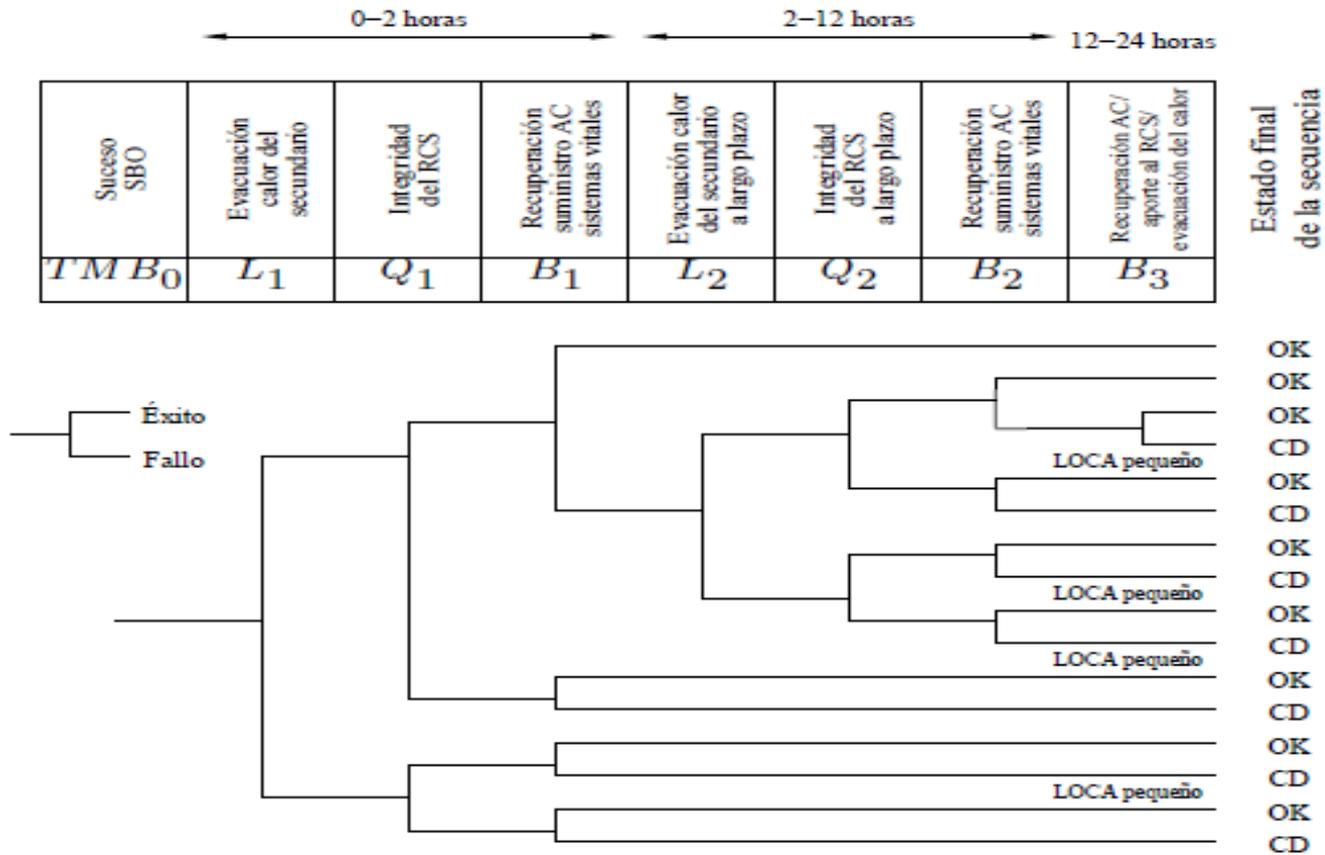
- Diseño original:
  - Dos circuitos independientes de suministro eléctrico exterior (mínimo)
  - Dos generadores diesel
- SBO supone perder todas las fuentes de CA (salvo la suministrada de baterías por inversores)
- NUREG-75/140 “Reactor Safety Study”: SBO contribuyente importante al riesgo
- 1989: 10CFR50.63: se requiere “coping analysis” para 2, 4 u 8 h (según emplazamiento)



Total Mean Core Damage Frequency:  $4.0E-5$

*APS Surry, 1991*

# SBO: Evolución

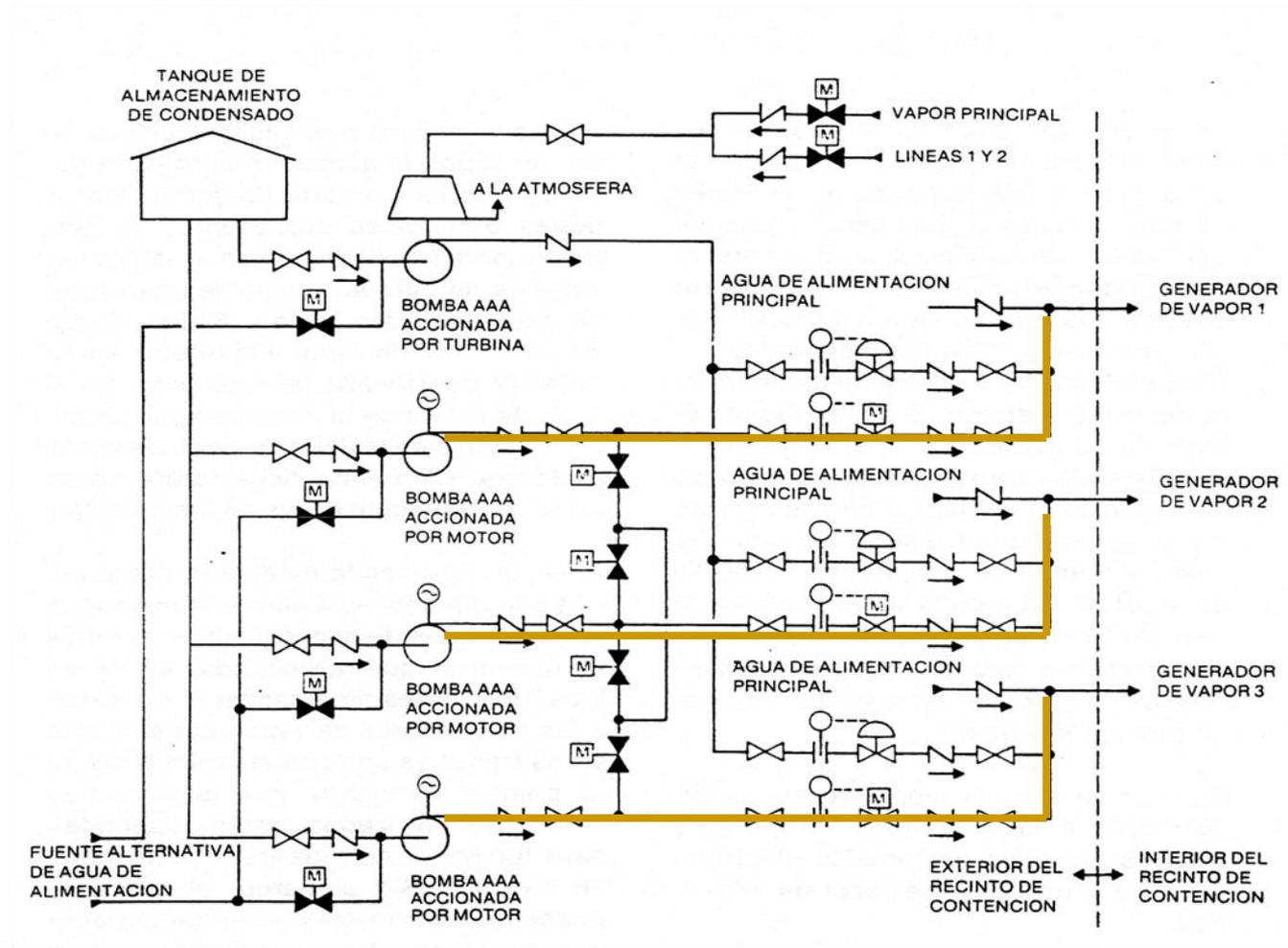


# Sistema de agua de alimentación auxiliar (AFW)

---

- ❑ Su función es proporcionar agua de refrigeración a los generadores de vapor, cuando el suministro normal de agua de alimentación a dichos generadores se interrumpe debido a:
  1. Paro de todas las bombas de alimentación por una pérdida de corriente eléctrica
  2. Funcionamiento incorrecto del sistema de alimentación
- ❑ Enfría el núcleo evitando la sobrepresión del sistema de refrigeración del reactor, y descubrimiento del núcleo por descenso del nivel de agua de la vasija, hasta que se alcanzan las condiciones que permiten entrar al SECR.
- ❑ El calor se elimina mediante liberación del vapor a la atmósfera a través de válvulas de alivio accionadas eléctricamente, o por válvulas de seguridad.
- ❑ El AFW mantiene el inventario de agua de los GV.

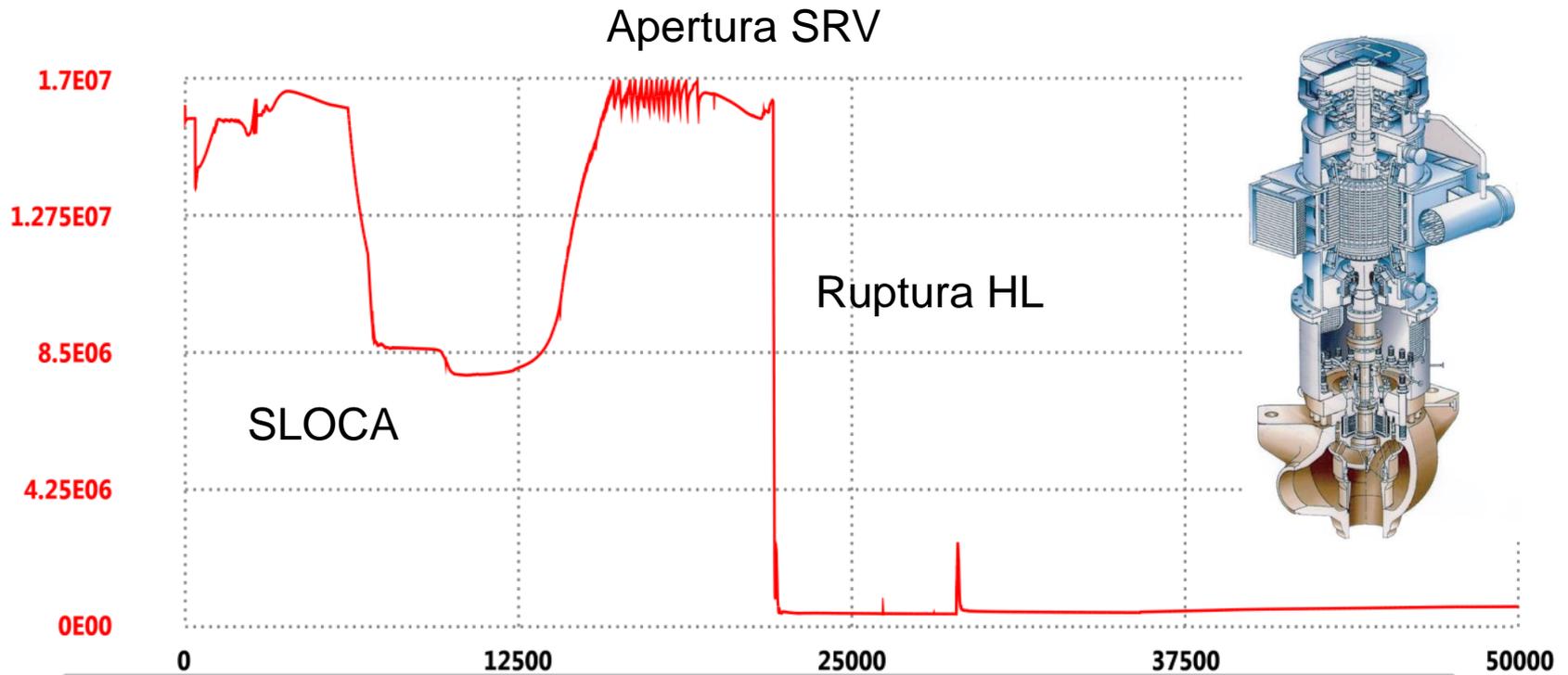
# 3 Sistemas de salvaguardias tecnológicas



- Agua de alimentación auxiliar

# SBO: Evolución

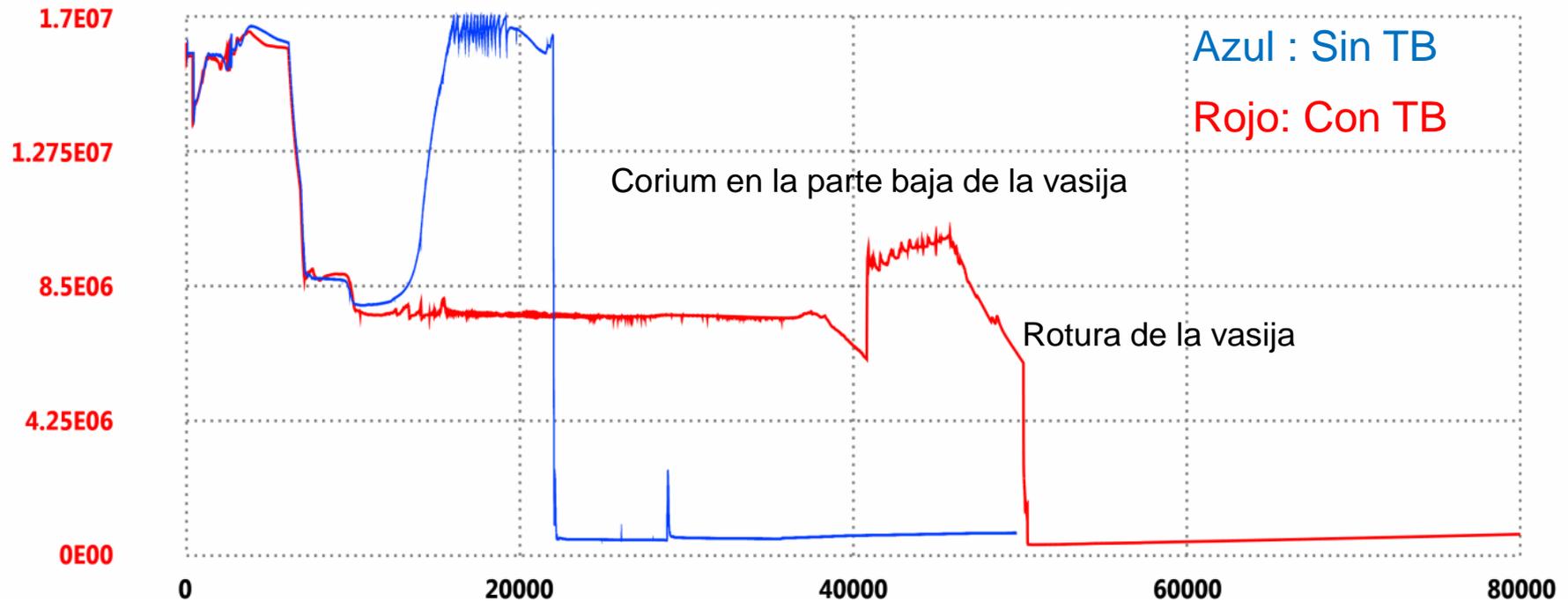
Presión en primario ante un SBO sin turbobomba



Ref: Annals of Nuclear Energy 2015; Fernández-Cosials, Jiménez, Barreira, Queral.

# SBO: Evolución

Presión en primario ante un SBO con turbobomba



Ref: Annals of Nuclear Energy 2015; Fernández-Cosials, Jiménez, Barreira, Queral.

# SBO: Control de Hidrógeno

Posibles medidas:

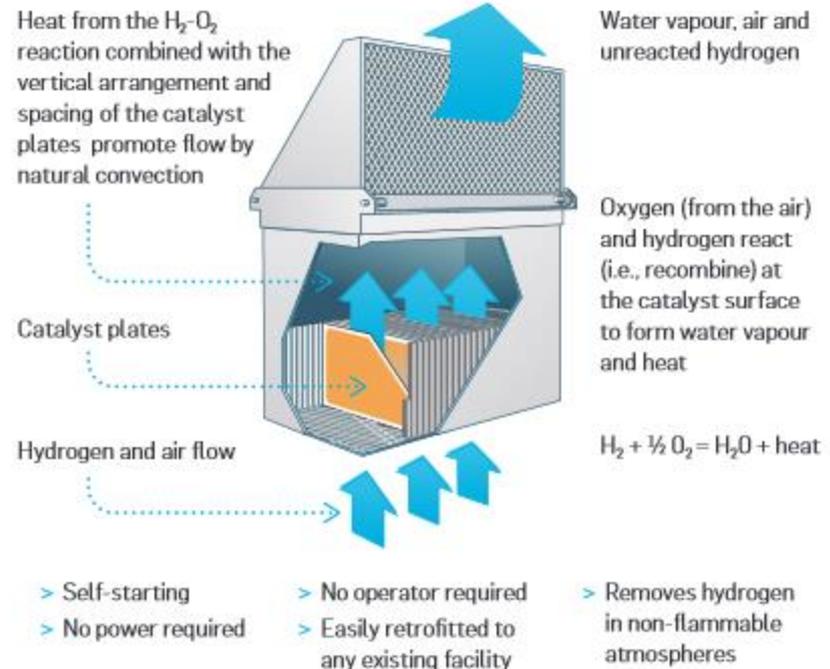
❑ **PARs:** Recombinadores de hidrógeno.

❑ **Ignitores:** Combustión controlada de Hidrógeno

❑ **Inertizadores:** Creación de mezclas no inflamables.

❑ **Venteo Filtrado:** Expulsión de hidrógeno mediante venteos

## A Hydrogen Management System



---

# Muchas Gracias por vuestra atención.

Preguntas ahora o en:

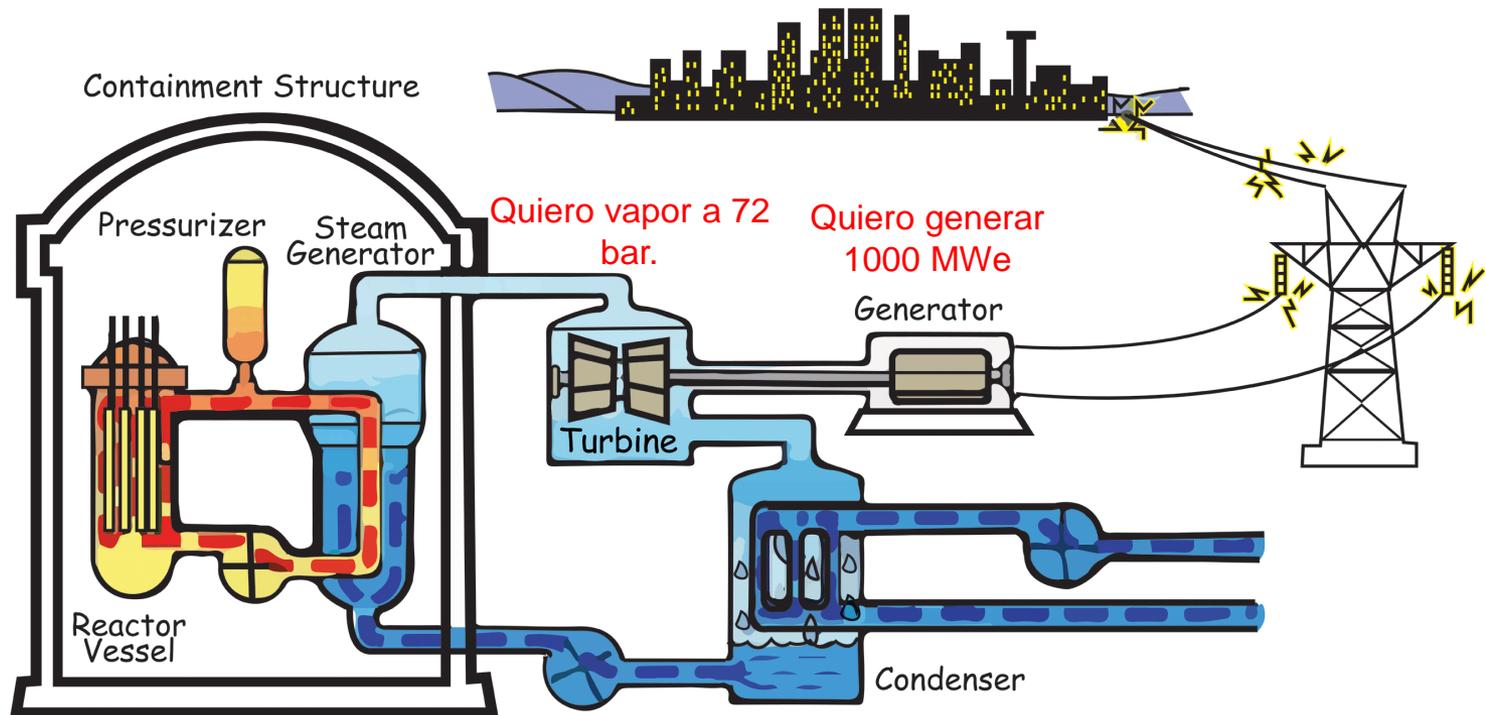
[kevin.fcosials@jovenesnucleares.com](mailto:kevin.fcosials@jovenesnucleares.com)

# ¿Por qué se opera a 155 bares?

Margen: 30°C

The Pressurized-Water Reactor (PWR)

Te daré agua a 315 °C, pero me dejaré un margen de seguridad para que nunca entre en saturación.



# ¿Por qué los generadores de vapor son tan altos ?

Inconvenientes:

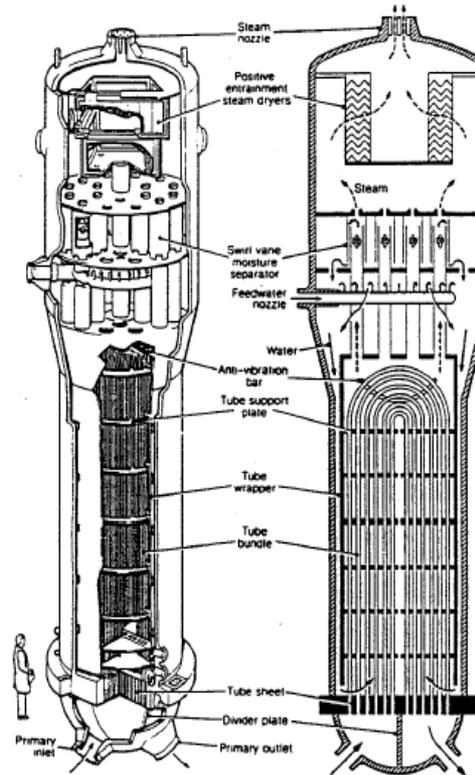
Peligrosidad ante sismos

Dificultad de transporte y acople

Menos resistencia a las grietas por fatiga

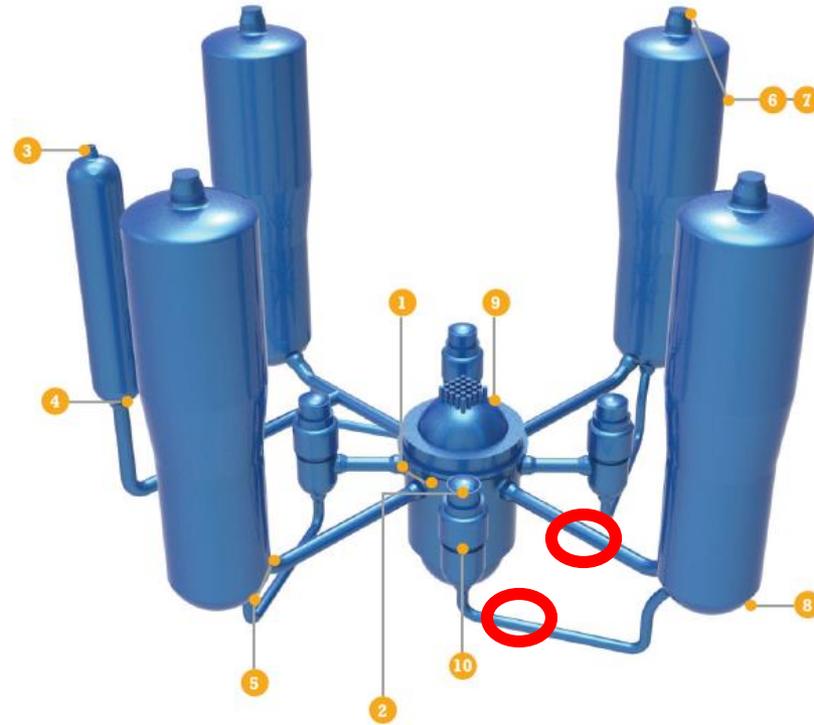
Ventajas:

La calidad del vapor es mucho mejor.



# ¿Por qué no hay válvulas de asilamiento de lazos?

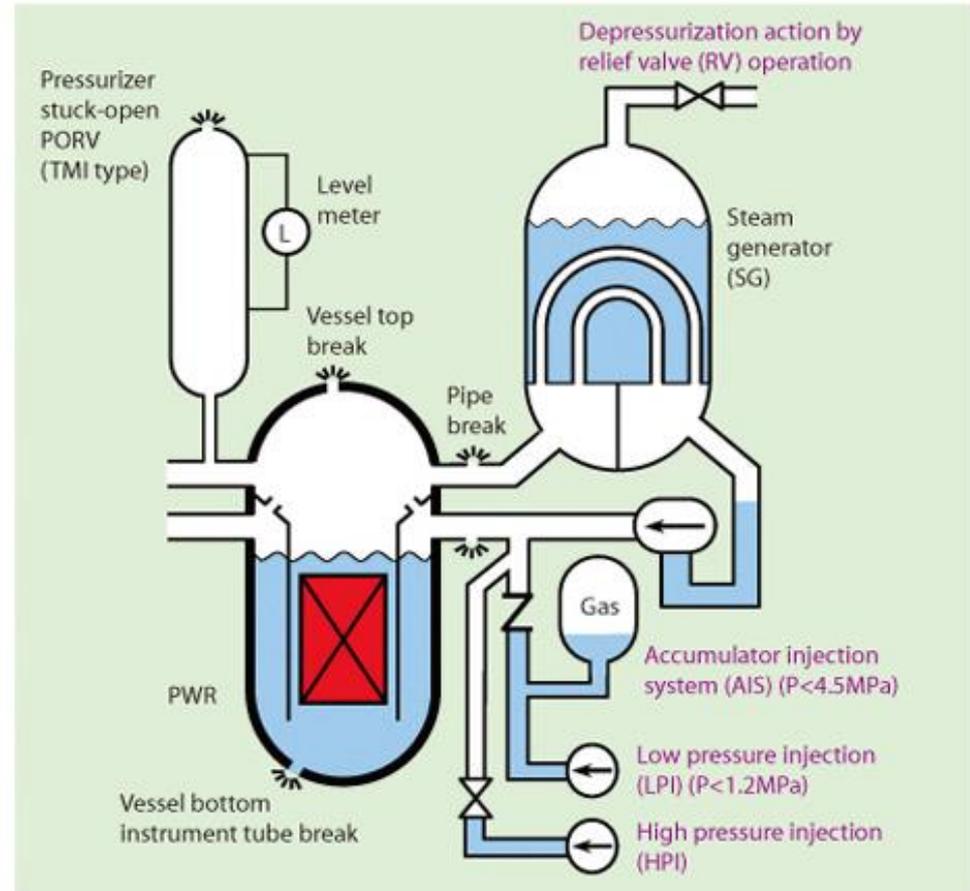
Accidente de cierre  
espurio de una  
válvula:  
Extremadamente  
peligroso



# ¿Por qué no se inyecta directamente a vasija?

Inconvenientes:  
Choque térmico  
muy grande.

Solución: Mejorar  
materiales o  
construcción de la  
vasija (AP1000 p.  
ej.)



# ¿Por qué no se puede usar la propia energía del reactor para alimentar la planta?

---

En realidad hay modelos (KWU p.ej.) que si que pueden...

Operación en **Modo ISLA**:

Desconexión de la red externa y funcionamiento en isla.

Central Nuclear de Trillo con esta capacidad, no necesitó estudios requeridos por el “Guidelines and Technical Bases for the Station Black Out Rule” NUMARC 8700 - 1987.

Requerimientos: Bombas de velocidad variable

