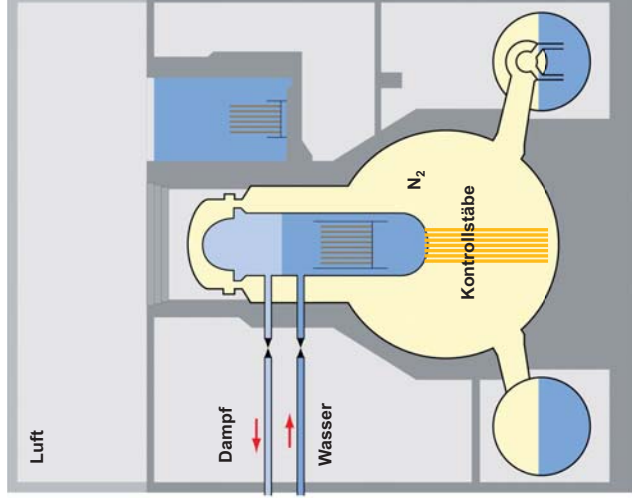
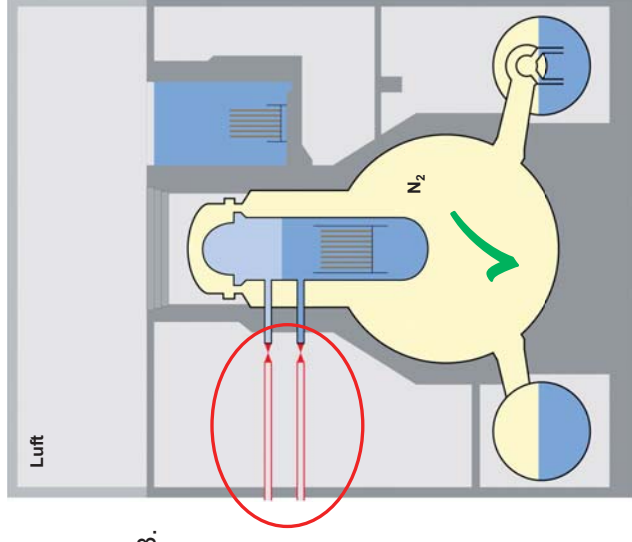


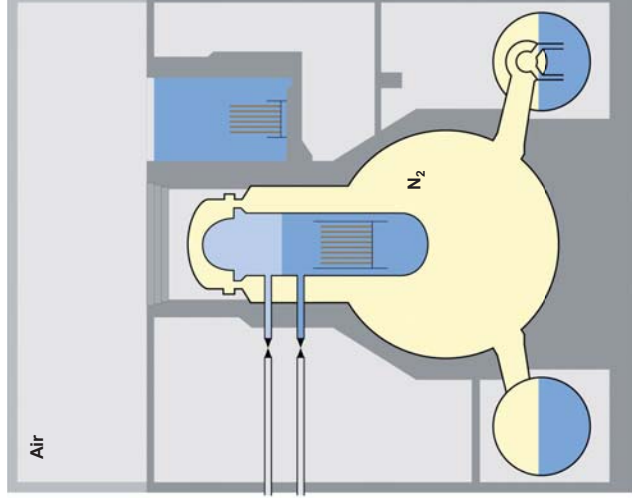
- ▶ **11. März 2011, 14:46 JST**
 - **Erdbeben der Stärke 9.**
 - Versagen des Stromnetzes im Nordosten von Honshu.
 - Reaktoren im Wesentlichen unbeschädigt.
- ▶ **Automatische Schnellabschaltung**
 - Stop der Energieerzeugung.
 - Weitere Wärmeerzeugung durch radioaktiven Zerfall von Spaltprodukten:
 - ▶ nach Scram ≈ 6 %
 - ▶ nach 1 Tag ≈ 1 %
 - ▶ nach 5 Tagen ≈ 0.5 %



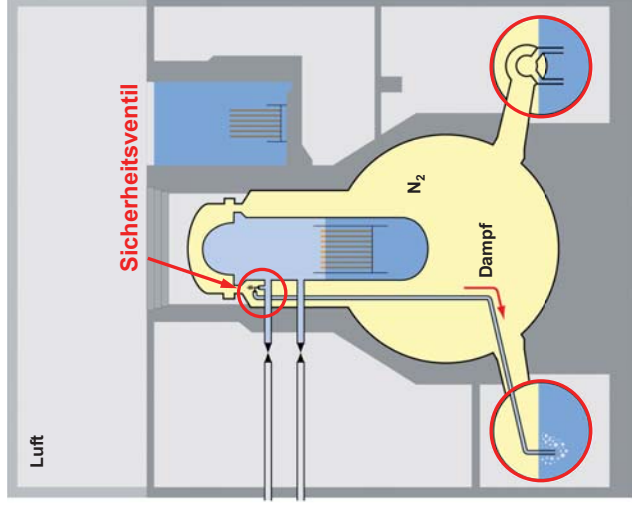
- ▶ **Gebäudeabschluss**
 - Absperrung aller nicht-sicherheitsrelevanten Durchdringungen des SHB.
 - Schutz vor Freisetzung radioaktiver Stoffe.
- ▶ **Start der Dieselgeneratoren**
 - Systeme zur Kernnotkühlung benötigen Elektrizität.
- ▶ **Stabiler Anlagenzustand.**



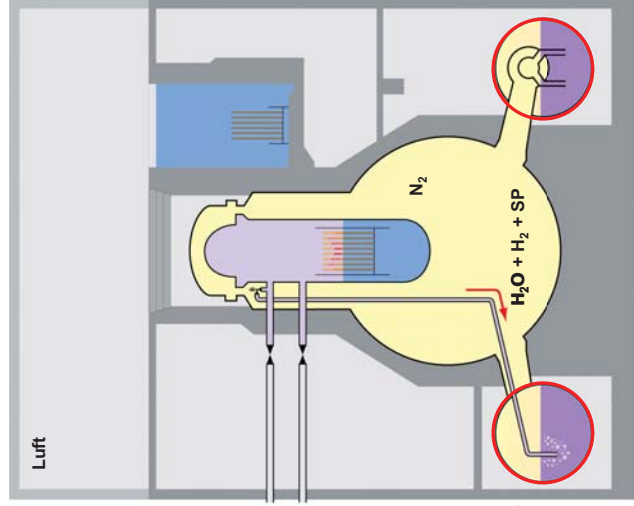
- ▶ **Tsunami trifft auf die Anlage**
 - Überflutung der Dieselgeneratoren und Wasserbauwerke.
- ▶ **Station Blackout**
 - Vollständiger Ausfall der Stromversorgung (extern, intern).
 - Nur Batterien stehen zur Stromversorgung noch zur Verfügung.
 - Verlust der Kernnotkühlung.
 - Der Isolation Condenser (Block 1) ging in Betrieb und die Dampf betriebenen Pumpen (Blöcke 2/3) arbeiteten.



- ▶ **Ausfall der Notkühlsysteme**
 - Block 1:** 11. März, 16:36, Batterien leer
 - Block 2:** 14. März, 13:25, Pumpenschaden
 - Block 3:** 13. März, 05:10, Batterien leer
- ▶ **Ausdampfen** des Reaktorkerns durch Nachzerfallswärme.
- ▶ **Sinkender Wasserspiegel** im Reaktorkern.
- ▶ **Abblasen von Wasserdampf** über ein Sicherheitsventil in die Kondensationskammer.
- ▶ **Temperatur- und Druckanstieg** in der Kondensationskammer.



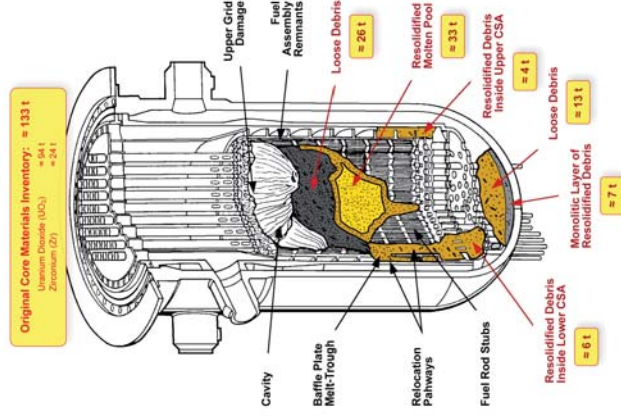
- ▶ **Hüllrohr-Temperaturen > 900 °C**
 - Erste lokale Kernschäden durch berstende Hüllrohre.
 - Freisetzung flüchtiger SP.
- ▶ **Hüllrohr-Temperaturen > 1200 °C**
 - Zirkonium-Dampf-Reaktion:
 $Zr + 2 H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2 H_2 + \text{Wärme}$
 - Selbstverstärkende Aufheizung.
 - Oxidation von 1 kg Zirkonium generiert ≈ 44.2 g Wasserstoff.
- ▶ **Vermutete Wasserstoff-Produktion**
 - 300 to 600 kg in Block 1,
 - 300 to 1000 kg in Blöcken 2 and 3.
- ▶ **Wasserstoff** gelangt mit Dampf und flüchtigen SP in die Kondensationskammer.
 Anstieg von Druck und Temperatur.



SP: Spaltprodukte

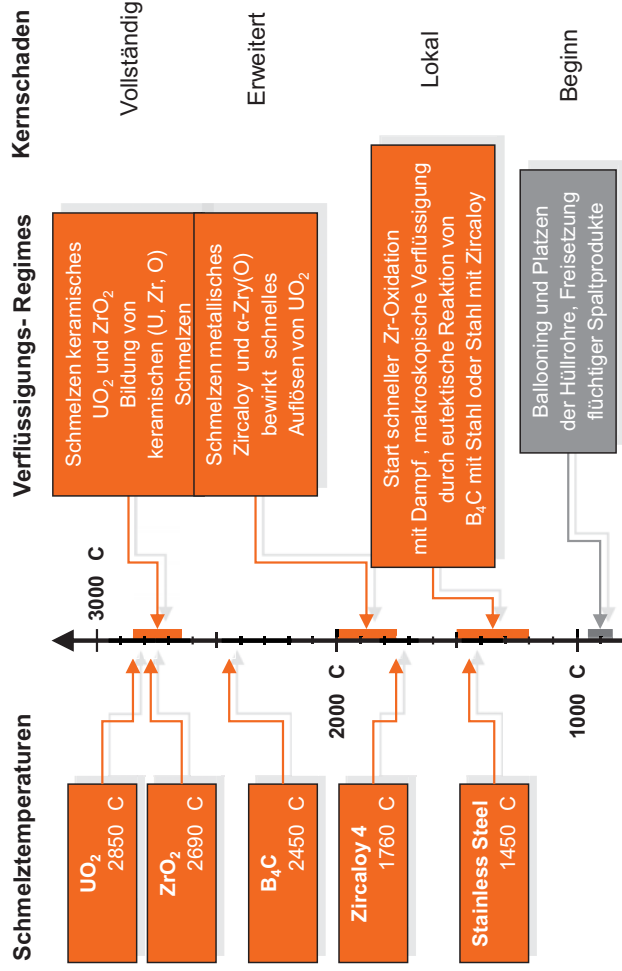
- ▶ **Nachbetrachtungsanalysen:** $\approx 70\%$ des Kerninventars beschädigt.
- ▶ **Gesamte Wasserstoffmasse:**
 $m \approx 459 \text{ kg}$
 Korrespondiert zu einem Wasserstoffvolumen von 5500 bis 6000 m³ bei Temperaturen zwischen 20 und 50 °C und Atmosphärendruck (Ideales-Gas-Gleichung):

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{p \cdot M}$$
 mit
 m Masse
 M molare Masse
 p Druck
 R Universale Gaskonstante
 T Absoluttemperatur in K
 V Volumen
- ▶ **Vollständige Oxidation des Zirkoniuminventars** hätte $\approx 1061 \text{ kg}$ produziert.



Sources: D. W. Akers et al., 1989 CSA: Core Support Assembly TMI-2: Three Mile Island Unit 2, Pressurized Water Reactor, 900 MW

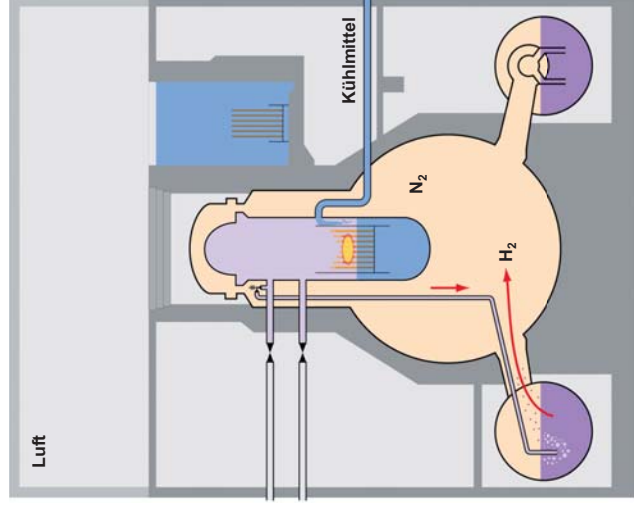
Kernmaterial Degradationsbereiche



Source: KIT, GRS, 2011

Fukushima Dai-ichi – Unfallablauf

- ▶ **Temperaturen ab etwa 1800 °C**
 - Schmelzen verbliebener metallischer Hüllrohrbestandteile und Edelstahlstrukturen.
- ▶ **Temperaturen ab etwa 2500 °C**
 - Zerstörung der Brennstabstruktur,
 - Schüttbett-Bildung.
- ▶ **Temperaturen ab etwa 2700 °C**
 - Aufschmelzen des Reaktorkerns.
- ▶ **Einspeisen von Meerwasser zur Beendigung des Kernschmelzens.**
- ▶ **Zeitraum ohne Kühlung**
 - Block 1: 12. März, 20:20 28 h**
 - Block 2: 14. März, 16:34 3 h**
 - Block 3: 13. März, 13:12 8 h**



► Freisetzung von Spaltprodukten

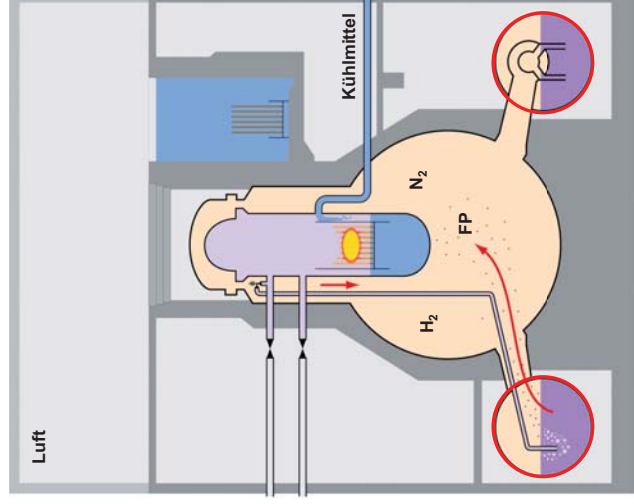
- Xenon, Cesium, Iod ...
- Uran and Plutonium verbleiben im Reaktorkern.
- Aerosolbildung durch Spaltproduktkondensation.

► Ablasen in die KoKa

- Pool Scrubbing führt zur partiellen Aerosol-Rückhaltung.

► Xenon und nicht zurückgehaltene Aerosole gelangen in die Atmosphäre des Sicherheitsbehälters (SHB)

- Oberflächenkontamination im SHB.



KoKa.: Kondensationskammer



► SHB-Funktion und -Eigenschaften

- Letzte Barriere zur Verhinderung einer SP-Freisetzung.
- Wandstärke: ≈ 3 cm.
- Auslegungsdruck: 4 bis 5 bar.

► Tatsächliche Drücke bis ca. 8 bar

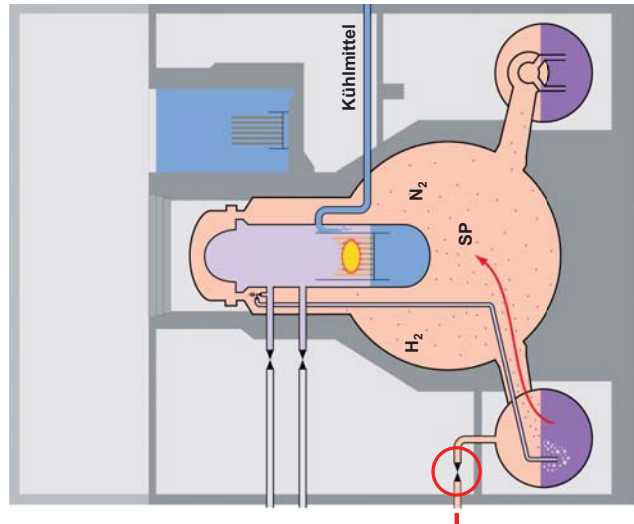
- Inertgasatmosphäre (Stickstoff),
- Wasserstoff aus Zirkoniumoxidation,
- Siedevorgänge in der KoKa (vgl. Schnellkochtopf).

► Erste Druckentlastung (Venting)

Block 1: 12. März, 10:17 Uhr,

Block 2: 13. März, 11:00 Uhr,

Block 3: 13. März, 08:41 Uhr.



SHB: Sicherheitsbehälter oder Containment; KoKa: Kondensationskammer; SP: Spaltprodukte

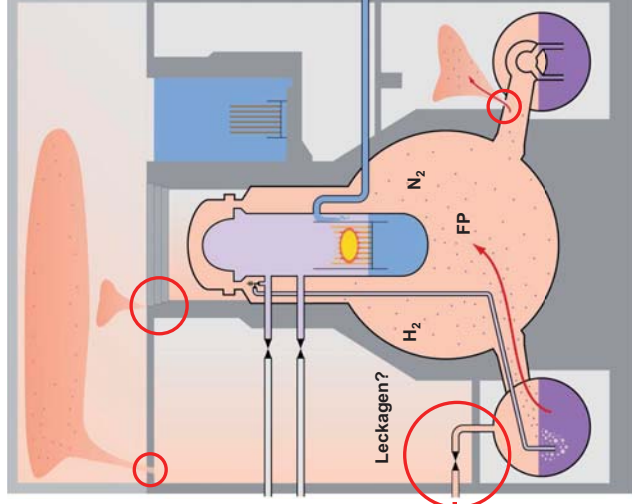


► Positive Aspekte der Druckentlastung

- Abgabe von Energie aus dem SHB,
- Druckabbau auf ≈ 4 bar.

► Negative

- Freisetzung von H_2 , Edelgasen und geringen Aerosolmengen (z. B. Iod und Cesium $\approx 0.1\%$).
- Möglichkeit einer H_2 -Explosion bei Leckagen.

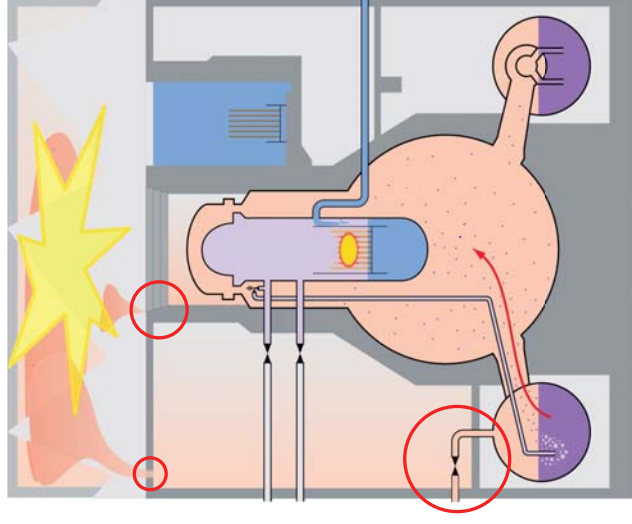


SHB: Sicherheitsbehälter oder Containment, KoKa: Kondensationskammer, SP: Spaltprodukte

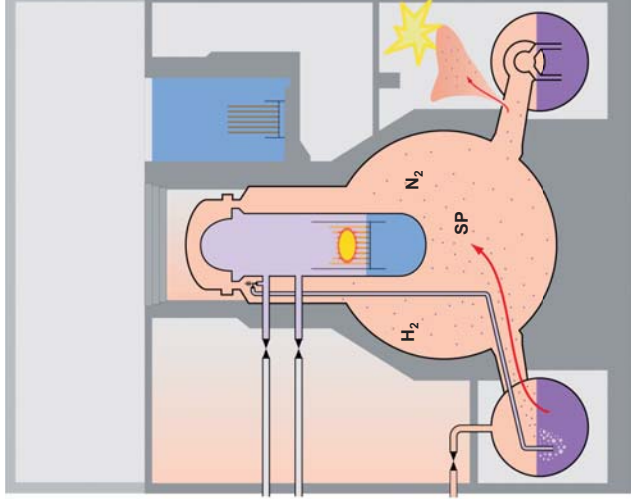


► Blöcke 1 und 3

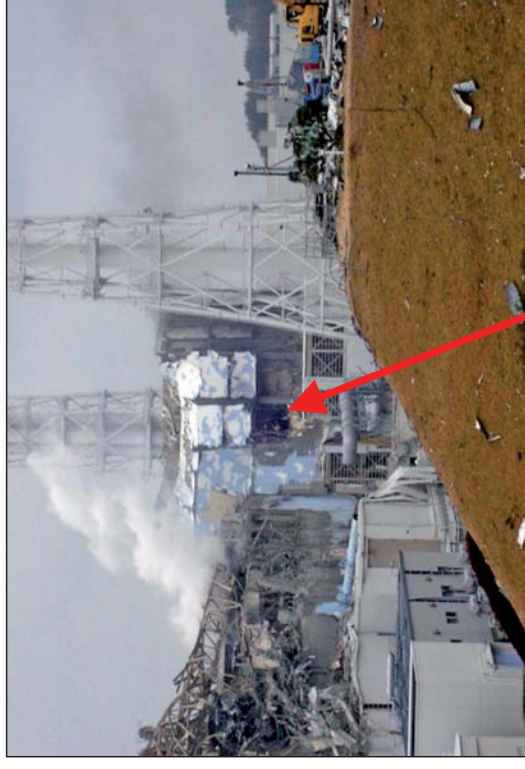
- Rekombinatoren nur für radiolysebedingte H_2 -Mengen
- H_2 -Explosion auf Beckenflur.
- Zerstörung der Stahlhüllkonstruktion.
- Stahlbeton-Reaktorgebäude nicht beschädigt.



- ▶ **Block 2**
 - Mögliche Beschädigung der KoKa in Folge eines Druckanstiegs innerhalb des RDB und SHB.
 - Hoch-kontaminiertes Wasser.
 - Unkontrollierte Gasfreisetzung aus dem SHB.
 - **Freisetzung von SP.**
 - Zeitweise Anlagenevakuierung wegen einer hohen lokalen Dosisrate auf der Anlage.



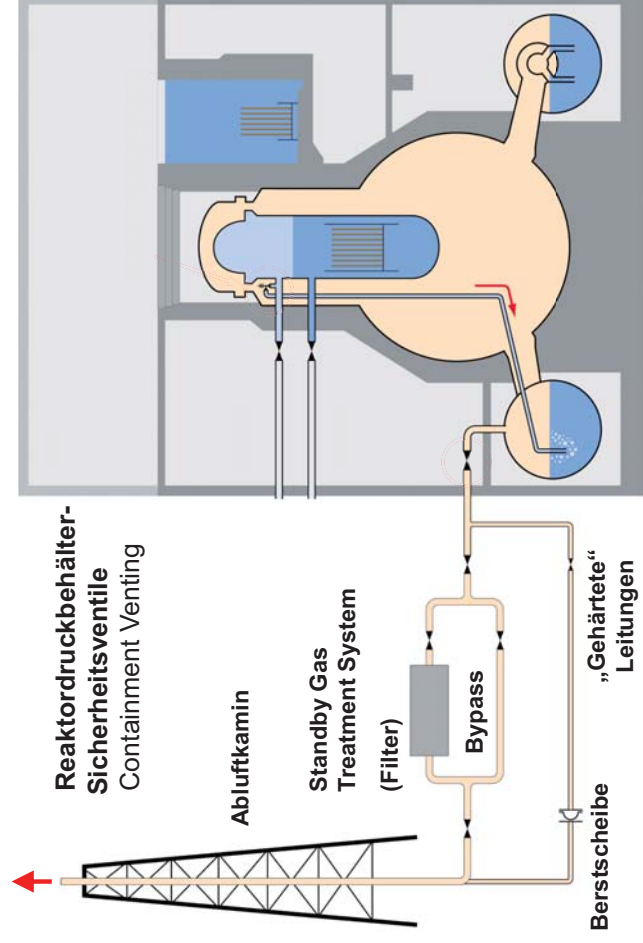
KoKa: Kondensationskammer, RDB: Reaktordruckbehälter, SHB: Sicherheitsbehälter oder Containment, SP: Spaltprodukte



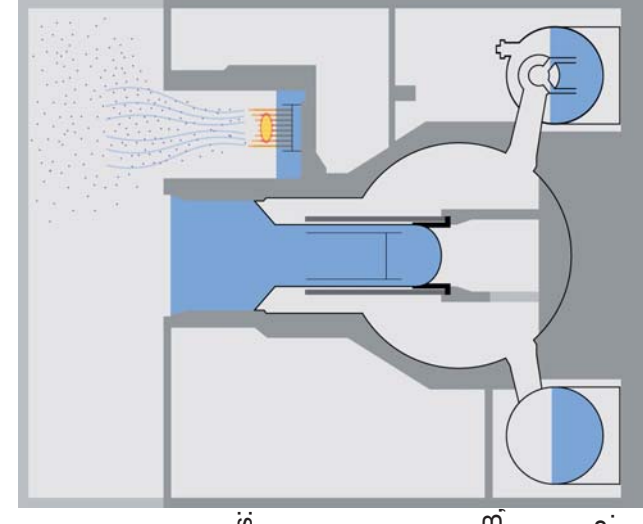
Explosion im Stahlbetongebäude von Block 4, obwohl kein Brennstoff im Reaktor war!



Quelle: Tepco, 2011



SHB: Sicherheitsbehälter oder Containment, SP: Spaltprodukte



SHB: Sicherheitsbehälter oder Containment, SP: Spaltprodukte

► Brennelementlagerbecken im Beckenflur:

- Alle Brennelemente aus dem Reaktorkern von Block 4 waren kurz vor dem Beben ins Lagerbecken umgesetzt worden.
- Ausdampfen des Wasserinventars:
 - Block 4 in zehn Tagen,
 - andere in einigen Wochen.
- Leckagen durch Erdbebenschäden?

► Konsequenzen:

- Kernschmelze außerhalb des SHB,
- keine Möglichkeit der SP-Rückhaltung,
- Massive Freisetzung flüchtiger SP.