

Hintergrundinformationen zu ausgewählten Themen zum nuklearen Störfall in Japan

Nr. 009
(18.03.2011, 13:20 Uhr)

Siedewasserreaktoren (KIT)

1. Funktionsweise

Wie bei allen nuklearen Reaktoren wird in den Brennstäben des Reaktorkerns auch im Siedewasserreaktor Wärme durch Kernspaltung freigesetzt. Bei der Spaltung entstehen zwei Teilkerne, die Spaltprodukte, prompte und verzögerte Strahlung und Neutronen. Die Neutronen besitzen anfangs eine hohe Energie. In den sogenannten thermischen Reaktoren werden die Neutronen durch Stöße an den Moderatoratomen abgebremst, bis sie sich im thermischen Gleichgewicht mit diesen befinden. Die Energie der Spaltprodukte und der übrigen Strahlung wird im Wesentlichen an den Brennstoff als Wärme abgegeben. In den Leichtwasserreaktoren ist der Moderator Wasser, das gleichzeitig als Moderator dient. Der Brennstoff ist Uranoxid in Tablettenform. Das Uran besteht aus einem spaltbaren Isotop, Uran 235, mit ca. 3% und einem nicht spaltbaren Anteil – Uran 238. Er ist von einer Hülle umgeben, die aus einer Zirkonium Legierung besteht. Brennstofftabletten und Hüllrohr bilden die Brennstäbe. Mehrere Brennstäbe sind zu Brennelementen zusammen gefasst.

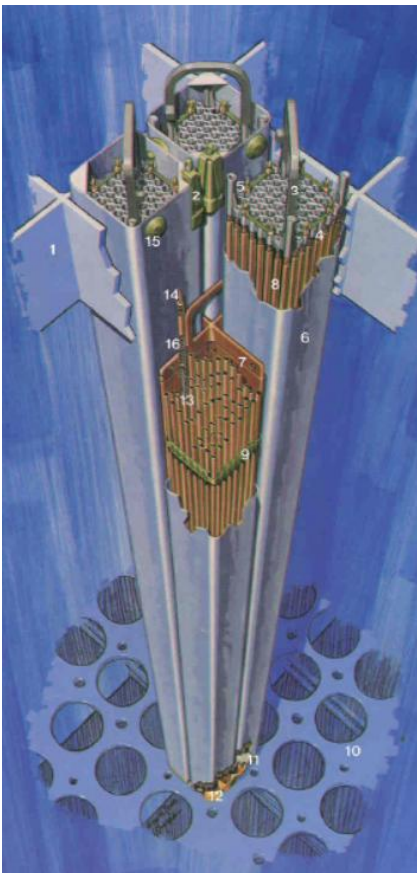


Abbildung 1: Brennelement eines Siedewasserreaktors

Die nukleare Wärme wird zur Erzeugung von Dampf mit hohem Druck genutzt. Dieser wird im Kraftwerk auf eine Turbine geleitet, die einen Generator antreibt, mit dem elektrischer Strom erzeugt wird. Nachdem der Dampf in der Turbine entspannt wurde, wird er in einem Kondensator auskondensiert. Das Wasser wird als Speisewasser mit hohem Druck wieder in den Reaktor zurückgefördert.

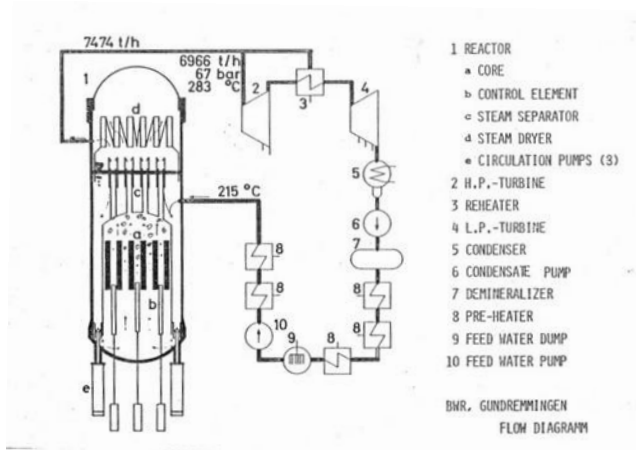


Abbildung 2: Fließschema eines Siedewasserreaktors mit internen Umwälzpumpen

Um einen hohen Wirkungsgrad bei der Umsetzung in mechanische Energie zum Antrieb des Generators zu erreichen, sollten Druck und Temperatur des Dampfes vor der Turbine möglichst hoch und im Kondensator möglichst niedrig sein. Ersteres stellt die Anforderung an die Auslegung der Reaktor- und Kraftwerksanlage. Im Kondensator wird die Kondensationswärme an einen externen Kühl- oder Wasserkreislauf an die Umgebung abgegeben. Standorte an Flüssen oder am Meer bieten das angestrebte niedrige Temperaturniveau für den Kondensator.

In Siedewasserreaktoren wird der Dampf direkt im Reaktor erzeugt. Da das Wasser gleichzeitig als Moderator zum Abbremsen der Neutronen gebraucht wird, kann es nur teilweise verdampft werden und der weitere Anteil wird zum Kerneintritt gepumpt. Der Kern wird von unten nach oben durchströmt. Der Dampf wird über dem Kern abgetrennt und zur Turbine geleitet. Das abgetrennte Wasser fließt nach unten, mischt sich mit dem Speisewasser und wird durch Zirkulationspumpen zurück unter den Reaktorkern gefördert. Je nach Reaktortyp wird die Zirkulation durch externe Umwälzschleifen und interne Wasserstrahlpumpen oder durch interne Axialpumpen umgewälzt.

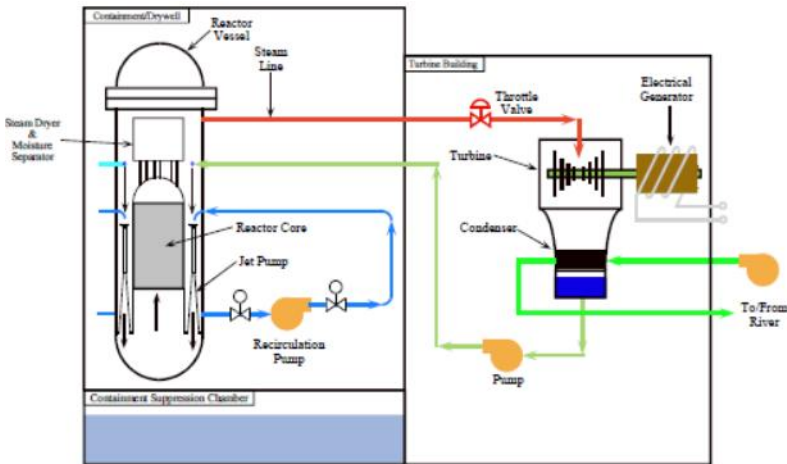


Abbildung 3: Fließschema eines Siedewasserreaktors mit externen Treibwasserschleifen und innen liegenden Wasserstrahlpumpen

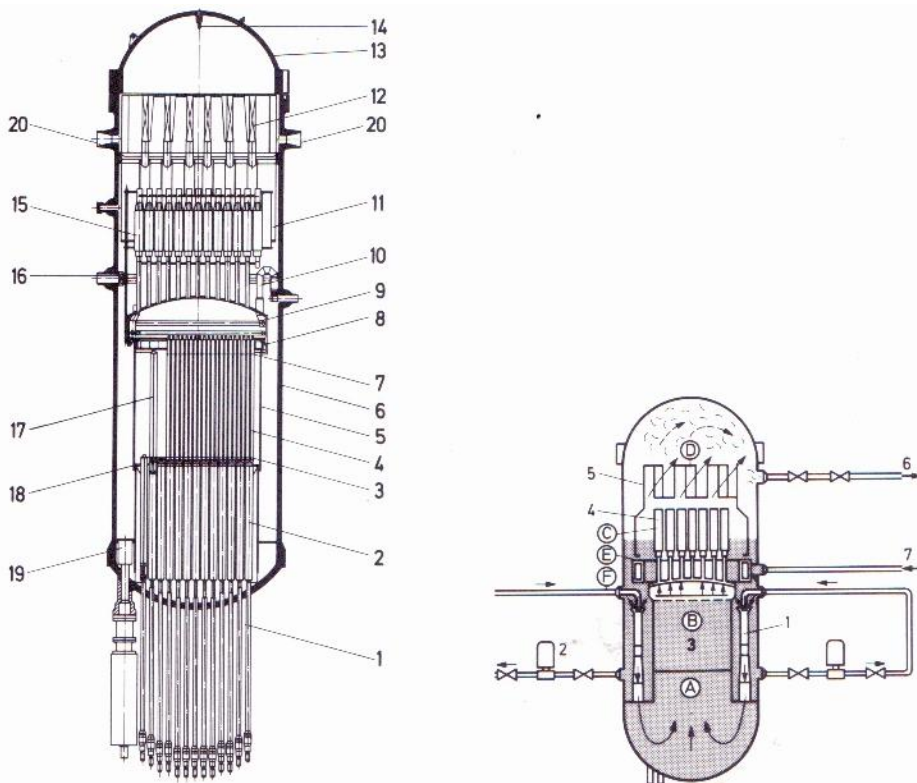


Abbildung 4: Druckbehälter von Siedewasserreaktoren mit internen Axialumwälzpumpen (links) und mit externen Treibwasserschleifen (rechts); die Darstellungen sind schematisch und nicht im gleichen Maßstab

Der Reaktorkern ist von einem Stahlbehälter umschlossen, der auch alle Einrichtungen zur Wasserrumwälzung und Dampfabtrennung enthält. Zur Sicherung der hohen Temperatur und Drücke ist er als Druckbehälter ausgelegt.

Die Neutronen aus den Spaltungen werden nach dem Abbremsen wieder in Uran eingefangen und erzeugen weitere Spaltungen. Dies ist die Kettenreaktion. Die Zahl der Neutronen im Reaktor entscheidet somit über die Wärmefreisetzung bzw. Leistung des Reaktors. Ein Teil der Neutronen entweicht über die Ränder des Reaktorkerns oder geht durch Verlustabsorptionen in anderen Materialien außer Uran bzw. dem nicht spaltbaren Anteil des Urans verloren. Die Absorptionen im nicht spaltbaren Uran führen zur Bildung von Plutonium. Damit enthält ein mit Uran betriebener Reaktorkern bald nach Betriebsbeginn stets Plutonium. Plutonium selbst ist teilweise wieder spaltbar und trägt zur Leistungserzeugung bei. Am Ende der Standzeit werden die Brennelemente entladen. Das restliche Uran insbesondere der spaltbare Anteil kann nach einer Wiederaufbereitung der Fertigung neuer Brennelemente zugeführt werden. Dies kann auch mit dem Plutonium erfolgen. Der Brennstoff wird in der chemischen Form des Urandioxids eingesetzt. Gemischt mit Plutonium spricht man von Mischoxid Brennstoff, dem MOX. Reaktoren die dieses verwenden, haben eine besondere Genehmigung.

Da die Neutronen im Reaktor über die Leistung entscheiden, wird ihre Zahl durch die Entfernung oder Zugabe geregelt. Dies erfolgt über Regelstäbe oder Abschaltstäbe mit geeigneten Absorbermaterialien. Die Zugabe von Borsäure in das Kühlmittel wird ebenfalls genutzt. In einem Siedewasserreaktor fahren die Regelstäbe von unten in den Reaktorkern ein. Für den Regelbetrieb werden sie mit Elektromotoren bewegt. Für die Schnellabschaltung werden sie mittels Druckspeicher hydraulisch eingefahren.

2. Nachwärmeabfuhr

Die oben erwähnten Spaltprodukte zerfallen unter Wärmeabgabe weiter, auch wenn der Reaktor abgeschaltet ist. Befinden sich MOX-Brennelemente im Reaktor steigt die Nachzerfallswärme um einige Prozent.

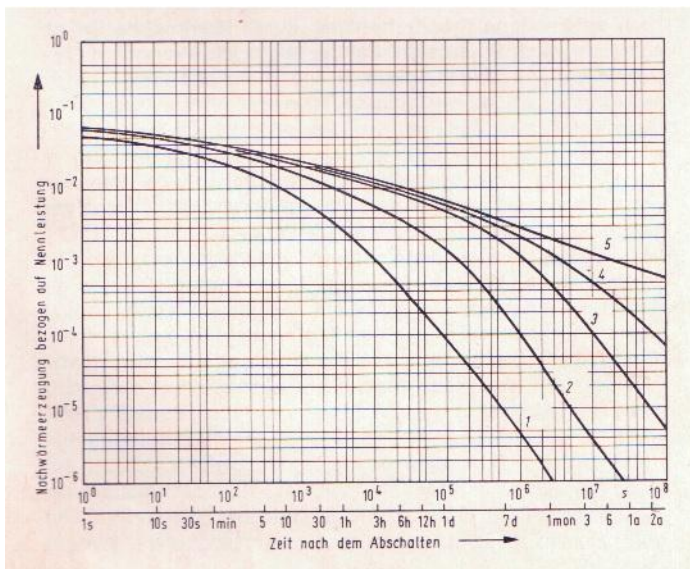


Abbildung 5: Nachwärme als Anteil der vorausgehenden Leistung für verschiedene Betriebszeiten über der Zeit nach dem Abschalten aufgetragen bei Verwendung von Uran Brennstoff; 1 nach 1 Stunde, 2 nach 1 Tag, 3 nach 1 Monat, 4 nach 1 Jahr und 5 nach einer unendlich langen Betriebszeit

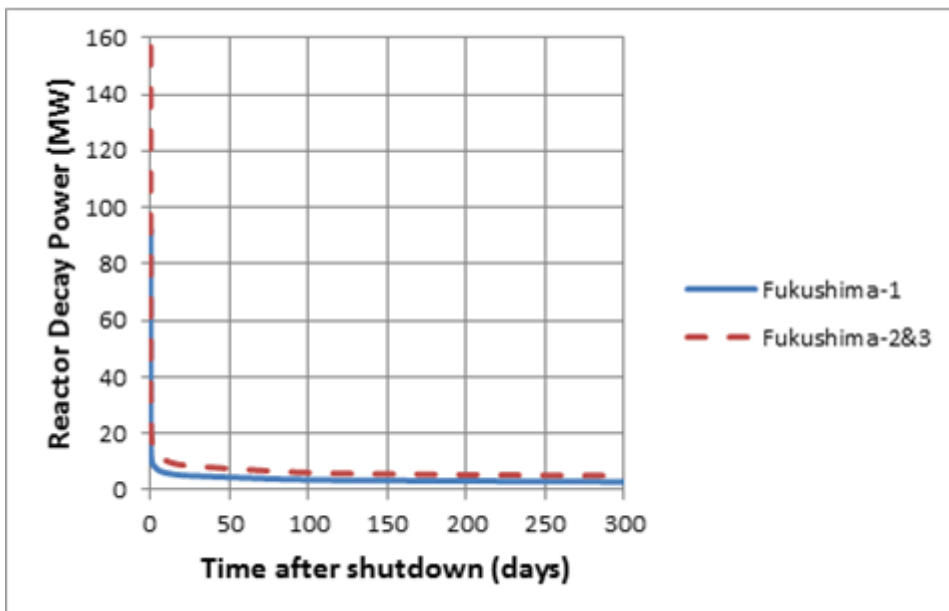


Abbildung 6: Nachzerfallswärme über der Zeit. Die Kurven beginnen nach der Schnellabschaltung der Reaktoren (vollständiges und schnelles Einfahren der Steuerstäbe) sofort nach dem Erdbeben

Die radioaktiven Substanzen sind 3-fach eingeschlossen. Das sind: der Brennstoff selbst mit der Brennstabhülle, dem Reaktordruckgefäß und das Sicherheitsgebäude d. h. hier das Stahlcontainment. Die im Betrieb vorhandene Wärmeabfuhr mit dem Dampf in die Turbine als und Kondensator als Wärmesenke und der Rückführung des Speisewassers muss dann ersetzt werden, jedoch auf einem deutlich geringeren Leistungsniveau durch Not-oder Nachwärmeabfuhrsysteme, um sicher zu stellen, dass diese 3 Barrieren auch nach einem Störfall garantiert sind.

Ein Teil der radioaktiven Substanzen sind Edelgase oder leicht flüchtig. Schwer flüchtige Substanzen können durch Partikelemissionen oder in gelösten Formen ausgetragen werden.

3. Reaktorsicherheitsbehälter

Der Reaktor wird durch ein Sicherheitsgebäude, Containment, umschlossen. Dies kann eine Stahlhülle oder ein Spannbetongefäß oder eine Kombination aus beidem sein. Zum Brennelementwechsel werden bei Siedewasserreaktoren der Deckel des Containments geöffnet und der Raum über dem Reaktor mit Wasser geflutet. Erst danach kann der Reaktortank geöffnet werden. Nachdem ein Zugang zu den Brennelementen geschaffen wurde, können diese in ein Brennelementbecken umgeladen werden.

Während des Betriebs ist das Stahlcontainment geschlossen und mit Stickstoff als Schutzgas inertisiert.

Das Reaktorgebäude der Siedewasserreaktoren hat als Besonderheit ein Druck-Unterdrückungs-System. Dieses besteht aus einer Wasservorlage, in die im Falle einer Reaktor Druckentlastung oder eines Versagens einer Leitung innerhalb des Stahlcontainments Wasserdampf eingeleitet und auskondensiert werden kann. Dennoch kann sich ein Druck aufbauen, so dass der Stahlcontainer für ca. 3bar Überdruck ausgelegt ist.

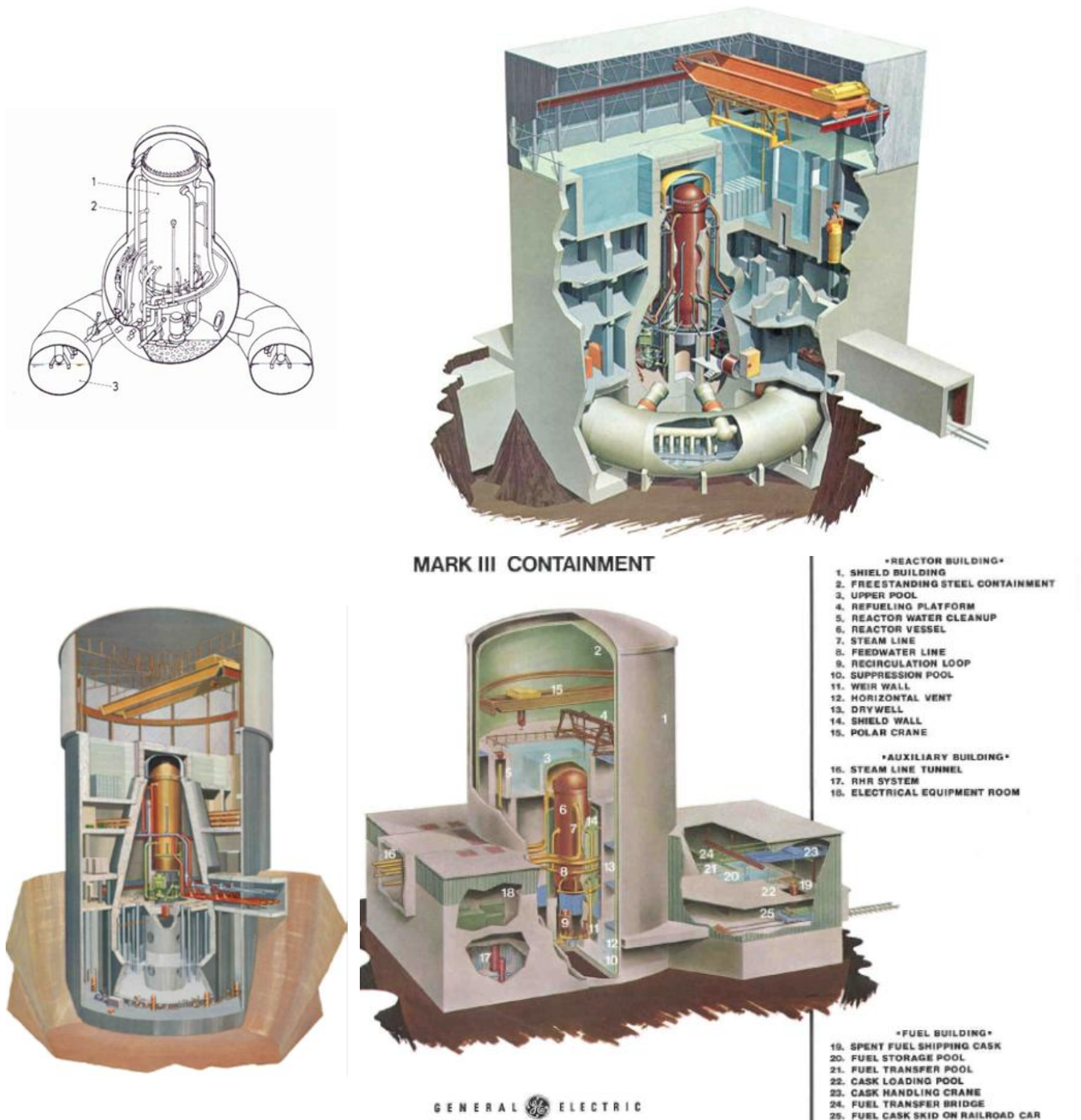


Abbildung 7: Amerikanische (General Electric) Sicherheitsgebäude mit Druck-Unterdrückungs-System für Siedewasserreaktoren; In der oberen Zeile das Mark I Containment mit der ringförmigen Kondensationskammer unter dem Reaktor entsprechend dem in Fukushima I

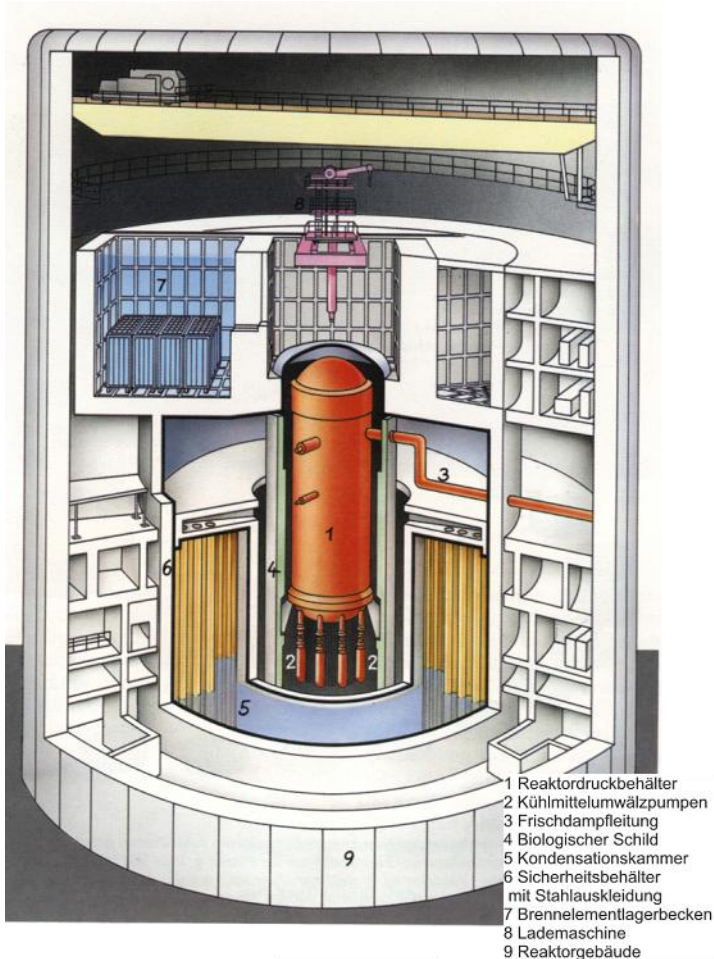


Abbildung 8: Sicherheitsgebäude für den Siedewasserreaktor von AREVA

4. Druckentlastung des Reaktordruckbehälters

Bei Ausfall der Turbine als Wärmesenke wird der Reaktor schnellabgeschaltet, so genannter Scram. So lange der Kondensator des Turbinenkreislaufs zur Verfügung steht, erfolgt die Umleitung des Dampfes direkt in den Kondensator. Sinkt der Wasserstand im Reaktor unter einen Grenzwert, oder ist nach einem Ausfall des Kondensators etwa nach einem Ausfall der Stromversorgung nicht zur Verfügung, wird die Frischdampfleitung geschlossen und Dampf in das Stahlcontainment entlastend abgegeben. Dies ist eine Wärmeabfuhr diversitär zu den Not- und Nachkühlsystemen. Eine weitere Möglichkeit ist die Dampfentnahme aus einer Frischdampfleitung zum Antrieb einer „Reactor Core Isolation Cooling“ Turbine mit einer Pumpe. Damit wird Wasser aus einem Kondensat Speichertank oder aus der Kondensationskammer des Stahlcontainments entnommen und in eine der Treibwasserschleifen gepumpt. Dieses System ist in den japanischen Anlagen amerikanischer Bauart eingebaut. Es ist kein Sicherheitssystem, wird aber bei Sicherheitsanalysen berücksichtigt. Die Druckentlastungsventile und Sicherheitsventile sind in den deutschen und japanischen Anlagen amerikanischer Bauart unterschiedlich aufgebaut.

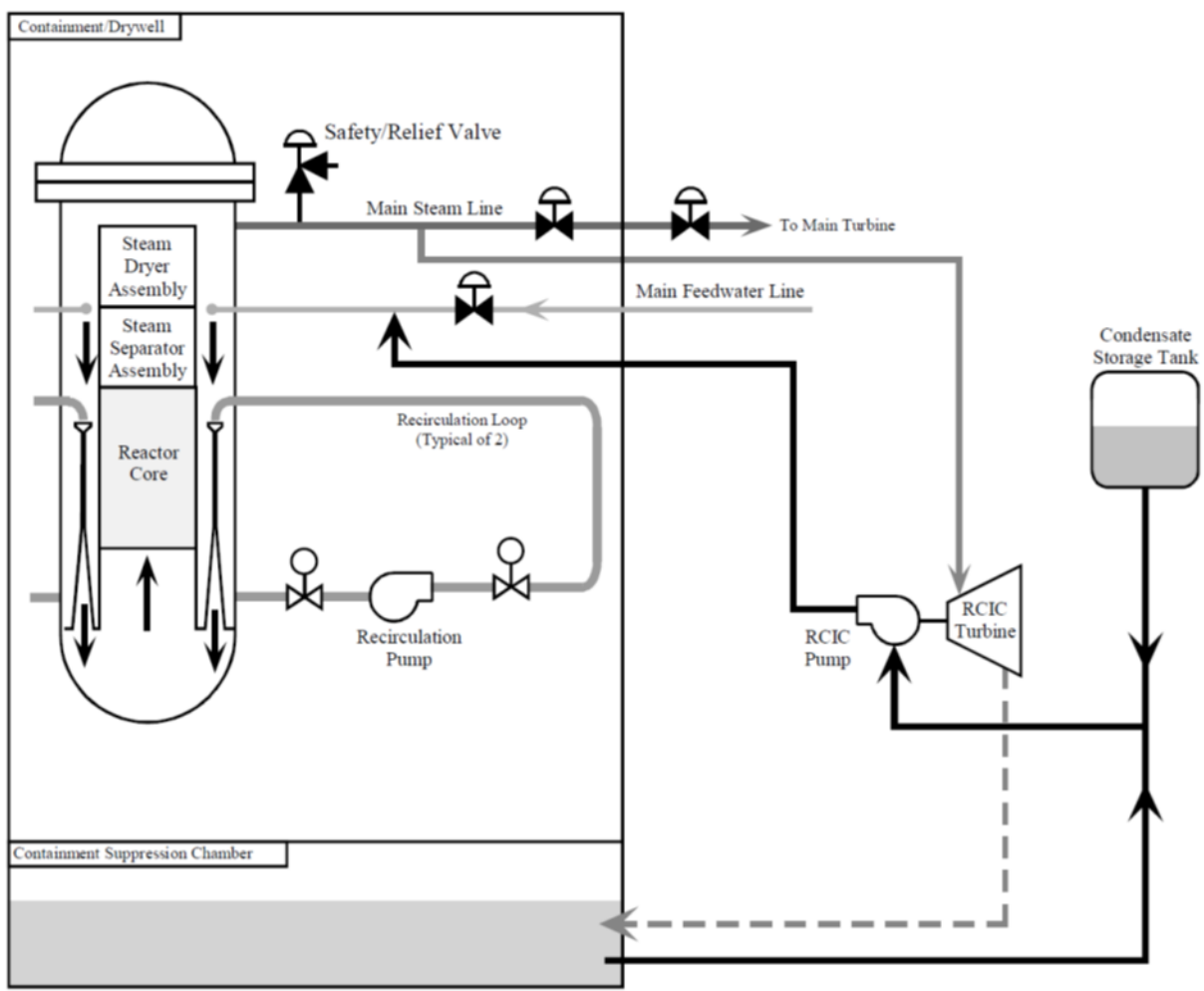


Abbildung 9: Siedewasserreaktor mit einem Reactor Core Isolation Cooling System mit einer Dampfturbine

5. Not- und Nachwärmeabfuhrsysteme

Das Not- und Nachwärmeabfuhrsystem hat die Aufgaben:

- die Nachwärme des abgeschalteten Reaktors abzuführen
- bei einem Kühlmittelverluststörfall das verlorene Kühlmittel zu ersetzen, den Kern kühlbar zu halten und die nachwärme langfristig abzuführen
- bei Bedarf das Wasser der Kondensatorkammer zu kühlen

Die Abbildung 10 zeigt ein Teilsystem des Not- und Nachkühlsystems eines deutschen Siedewasserreaktors (früher KWU). Insgesamt sind 3 dieser Systeme vorhanden. Jedes reicht allein aus (3x100%, Einzelfehler an einem, Reparatur an einem zweiten Teilsystem wird unterstellt).

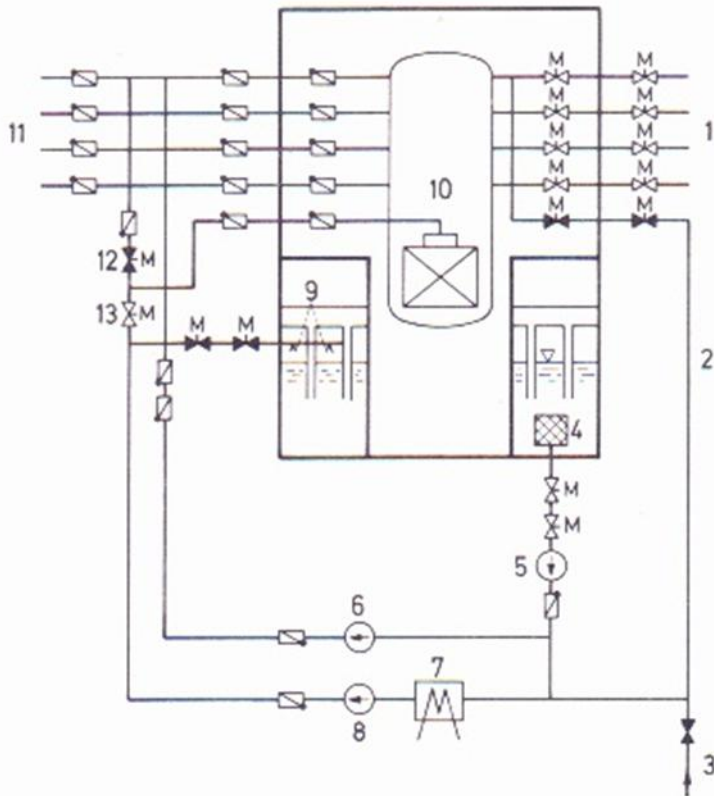


Abbildung 10: Not- und Nachwärmeabfuhrsystem eines deutschen Siedewasserreaktors – es sind drei gleich aufgebaute Systeme vorhanden, so dass eine 3x100% Redundanz besteht – die Darstellung zeigt nur 1 System

Bei einem Kühlmittelverluststörfall saugen die Hochdruck-(6) und Vorpumpen(5) Wasser aus der Wasservorlage der Kondensationskammer(4) an. Die Hochdruckpumpen speisen in jeweils eine der Speisewasserleitungen ein. Die gezeigte Niederdruckpumpe (8) saugt über die Wärmetauscher (7) Wasser an und fördert es durch die Kernflutleitung über den Reaktorkern. Die anderen beiden Niederdruckpumpen haben keine Verbindung zu einer Kernflutleitung sondern speisen in die Speisewasserleitungen ein. Soll das Wasser in der Kondensatkammer gekühlt werden, kann über die Leitung (9) gekühltes Wasser in die Kondensatkammer rückgeführt werden.

Beim betrieblichem Nachkühlen wird statt aus der Kondensatkammer über die Leitung (2) aus der Frischdampfleitung angesaugt. Bei geöffnetem Reaktordruckbehälter muss das Beladbecken mit gekühlt werden und die Ansaugung ist über die Leitung (3) möglich.

Nicht gezeigt ist in dem Schema die Versorgung der Pumpen (5, 6 und 8) mit elektrischer Leistung mit einem Notstromdiesel bei einem Ausfall aller Netzverbindungen und der Eigenbedarfsversorgung durch die Anlage selbst. Ebenso bedarf es eines Kühlsystems einschließlich Pumpen zur Wärmeabfuhr in Kühler (7).

Die folgende Abbildung 14 zeigt das Schema des Not- und Nachkühlsystems eines japanischen Siedewasserreaktors amerikanischer Bauart. Es besteht aus einem

- Hochdrucksprühsystem,
- Niederdrucksprühsystem,
- drei Niederdruck-Eispeisesysteme

Außerdem wird für bestimmte Störfälle (z. B. kleine Lecks) das hier nicht gezeigte automatische Druckentlastungssystem benötigt. Ein weiteres Core-Isolations-Kühlsystem steht ebenfalls zur Verfügung. Hierfür gibt es eine Energieversorgung aus Batterien mit einer Kapazität für einige Stunden.

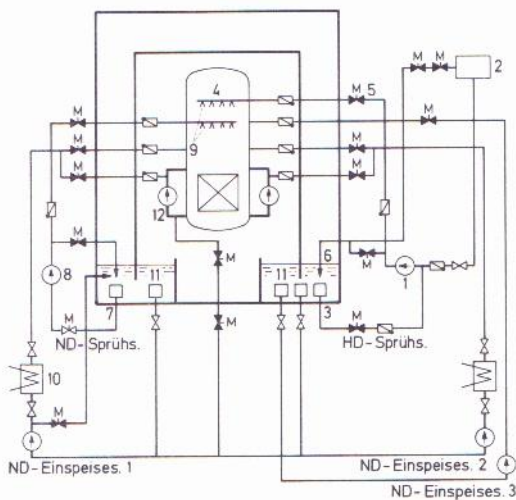


Abbildung 11: Schema des Not- und Nachwärmeabfuhrsystems eines Siedewasserreaktors japanischer/amerikanischer Bauart; es gibt ein Hoch- und Niederdrucksystem; das Niederdrucksystem ist dreifach ausgelegt mit jedoch in einem der Teilsysteme ohne Kühler

Die Pumpe des Hochdruck-Sprühsystems (1) saugt normalerweise aus dem Kondensatsammelbehälter des Hauptkühlsystems d. h. Speisewassersystems an. Es kann aber auch aus dem Wasserbecken der Kondensatkammer ansaugen. In der Zuleitung zum Reaktor sind außer den beiden Rückschlagklappen ein Motor gesteuertes Ventil eingebaut. Zu Prüfzwecken ist auch eine Einspeisung in die Kondensatkammer möglich.

Das Niederdrucksystem gleicht dem Hochdrucksystem. Es saugt jedoch nur aus dem Wasserbecken der Kondensatkammer an.

Die Niederdruckeinspeisesysteme 1 und 2 enthalten einen Kühler. Wasser kann aus den Wasservorlagen der Kondensatkammer oder aus den Umwälzschleifen entnommen werden. Letzteres wird für die betriebliche Nachwärmeabfuhr genutzt. Nach Passieren der Kühler (10) kann das Wasser in die Umwälzschleifen oder in die Wasservorlage der Kondensatkammer geleitet werden. Das Niederdrucksystem 3 besitzt keinen Kühler. Diese Not- und Nachwärmeabfuhrsysteme können daher nur einen Einzelfehler beherrschen. Das Hochdruckeinspeisesystem besitzt eine Fördermenge etwa der eines Niederdrucksystems. Nicht gezeigt hier ist die Versorgung mit ebenfalls einem Notstromdiesel bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung bei gleichzeitigem Ausfall der Netzverbindung. Ebenso müssen Kühlleistungen zur Verfügung stehen, d. h. eine intakte Versorgung durch die Wasserentnahmestelle.

Das japanisch/amerikanische Hochdrucksystem hat eine große Fördermenge ähnlich der des Niederdrucksystems. Dies ist für die Beherrschung eines kleinen Lecks, dem eigentlichen Zweck des Systems nicht erforderlich. Es sollte jedoch zur Beherrschung eines Kühlmittelverluststörfalls voll redundant zum Niederdrucksystem sein. In den Zuleitungen von den Pumpen zum Sprühverteiler im Reaktor Drucktank ist zwischen den beiden Rückschlagklappen ein Motorventil eingebaut, das im Bedarfsfall geöffnet werden muss.

Die Niederdrucksysteme sind vergleichbar. Das japanisch/amerikanische System besitzt die gleiche Anzahl von Teilsystemen, jedoch ist die Redundanz nicht vollständig dreifach, da im System 3 der Kühler fehlt. Es besteht die Möglichkeit mit dem Niederdrucksystem Wasser zu einem Sprühverteiler im oberen Bereich des Containments zu pumpen.

6. Abschließender Kommentar

Die Reaktoren in Fukushima gingen nach einander über 8 Jahre in Betrieb. Die Hersteller wechselten. Die Reaktoren haben unterschiedliche Leistungen. In dieser Zeit gab es eine weitreichende Weiterentwicklung in der Reaktortechnik und insbesondere der Sicherheitstechnik. Alleine die Containmentstruktur hat sich von Mark I bis Mark III geändert. Ähnliche Entwicklungen gab es auch in Deutschland. Aus schematischen Zeichnungen oder aus Systembeschreibung, die nicht dem neuesten Ausbaustand entsprechen lässt sich kein bewertender Vergleich erstellen. Es gab eine Reihe von Sicherheitsstudien, die herangezogen werden sollten. Zur Bewertung der Situation in deutschen Kernkraftwerken muss insbesondere auf die Arbeit der Reaktorsicherheitskommission verwiesen werden.

Nach dem Erdbeben der Stärke 9,0 wurden die Reaktoren abgeschaltet und die Notkühlmassnahmen liefen wie vorgesehen an. So weit bekannt, ging man beim Auslegungsbeben von der Stärke 8,2 aus. Der eigentliche Störfall wurde durch den Tsunami ausgelöst, durch den die externen Teile der Notkühlkette beeinträchtigt wurden. Nach den Luftaufnahmen zerstörte die Tsunamiwelle sowohl die Notstromdiesel als auch die Wasserein-

laufbauwerke. Bei Fukushima I wurde ein Batterie-versorgtes System, vermutlich das Kern-Isolierungs-System bis zum Ende der Kapazität der Batterien benutzt. Es handelt sich bei diesem System nicht um ein Sicherheitsrelevantes System, so dass die Anlage hiermit nicht als „sicherer ausgelegt“ bewertet werden kann. Bei den weiteren Versuchen den Reaktor zu kühlen, gelang dies mit eingeschränkter Wärmeabfuhr und nur zeitweiligen. Es gab Meldungen, dass nach dem Erdbeben Ventile klemmten.

Ein Ereignis mit einer so vollständigen Zerstörung der äußeren Kühlketten und aller Stromversorgungen ist an deutschen Kernkraftwerken nicht bekannt.

Der Ereignis im Brennelementbecken von Block IV von Fukushima dürften Teil von derzeit laufenden internationalen Untersuchungen sein. Allgemein lässt sich festhalten, dass eine Absicherung des Brennelementbeckens im Bereich über dem Stahlcontainments von älteren Siedewasserreaktoren in Deutschland gegen Einwirkungen von außen nachgerüstet werden müsste, wenn nicht bereits erfolgt.



Abbildung 12: Fukushima I nach der Zerstörung durch den Tsunami



Abbildung 13: Fukushima I vor dem Erdbeben

Das Kernkraftwerk Fukushima I hat insgesamt sechs Blöcke, von denen drei offenbar zerstört sind. Zwei weitere sind in Planung.

Tabelle 1: Aufstellung der Blöcke für Fukushima I

Reaktorblock	Reaktortyp	Nettleistung	Bruttolleistung	Baubeginn	Netzsynchro- nisation	Kommerzi- eller Betrieb	Abschal- tung (er- wartet)
Fukushima I-1	Siedewasserre- aktor	439 MW	460 MW	28. Juli 1967	17. November 1970	26. März 1971	vermutlich zerstört (März 2011)
Fukushima I-2	Siedewasserre- aktor	760 MW	784 MW	9. Juni 1969	24. Dezember 1973	18. Juli 1974	zerstört (März 2011)
Fukushima I-3	Siedewasserre- aktor	760 MW	784 MW	28. Dezemb- er 1970	26. Oktober 1974	27. März 1976	vermutlich zerstört (März 2011)
Fukushima I-4	Siedewasserre- aktor	760 MW	784 MW	12. Februar 1973	24. Februar 1978	12. Oktober 1978	(Oktober 2018)
Fukushima I-5	Siedewasserre- aktor	760 MW	784 MW	22. Mai 1972	22. September 1977	18. April 1978	(April 2018)
Fukushima I-6	Siedewasserre- aktor	1.067 MW	1.100 MW	26. Oktober 1973	4. Mai 1979	24. Oktober 1979	(Oktober 2019)
Fukushima I-7	Fortgeschrittener Siedewasserre- aktor	1.325 MW	1.380 MW			(2014 ge- plant)	
Fukushima I-8	Fortgeschrittener Siedewasserre- aktor	1.325 MW	1.380 MW			(2015 ge- plant)	