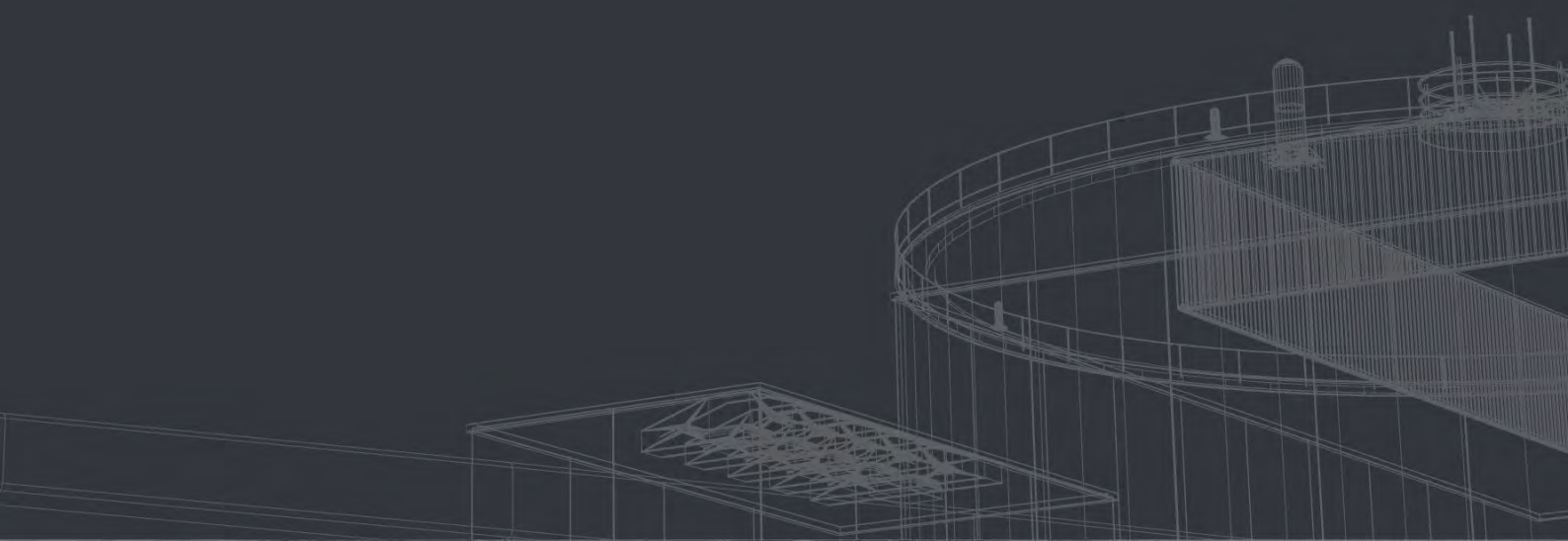
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Ablauf Fukushima 11032011

Ereignisabläufe

Fukushima Dai-ichi und Daini infolge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011



Fukushima

37° 25‘ 26.57“ N, 141° 1‘ 56.87“ E
11.03.2011

Einleitung

Unmittelbar nachdem am 11. März die ersten Livebilder vom Unfall im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi in alle Welt ausgestrahlt wurden, hat das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI eine interne Expertengruppe aus Ingenieuren, Geo- und Nuklearphysikern und Psychologen eingesetzt.

Diesem interdisziplinären „Japan-Team“ wurde die Aufgabe übertragen, die Daten und Informationen zum Kernkraftwerkunfall aus Japan zu sammeln und zu analysieren, um daraus allfällige Schlüsse für die Sicherheit der Kernkraftwerkanlagen in der Schweiz zu ziehen.

Aufgrund der ersten Auswertungen des Unfallhergangs durch das Japan-Team verfügte das ENSI am 1. April, dass die schweizerischen Kernkraftwerkbetreiber bis Ende Juni einen Nachweis für die Beherrschung „eines sehr unwahrscheinlichen Extrem-Hochwassers“ erbringen mussten. Dies führte unter anderem dazu, dass das Kernkraftwerk Mühleberg Ende Juni früher als geplant vom Netz ging, um die jährlichen Revisionsarbeiten auszuführen.

Die Berichte der Kraftwerke sind fristgerecht Ende Juni beim ENSI eingegangen. Die Resultate der Überprüfung dieser Eingaben wird das ENSI am 7. September 2011 der Öffentlichkeit präsentieren.

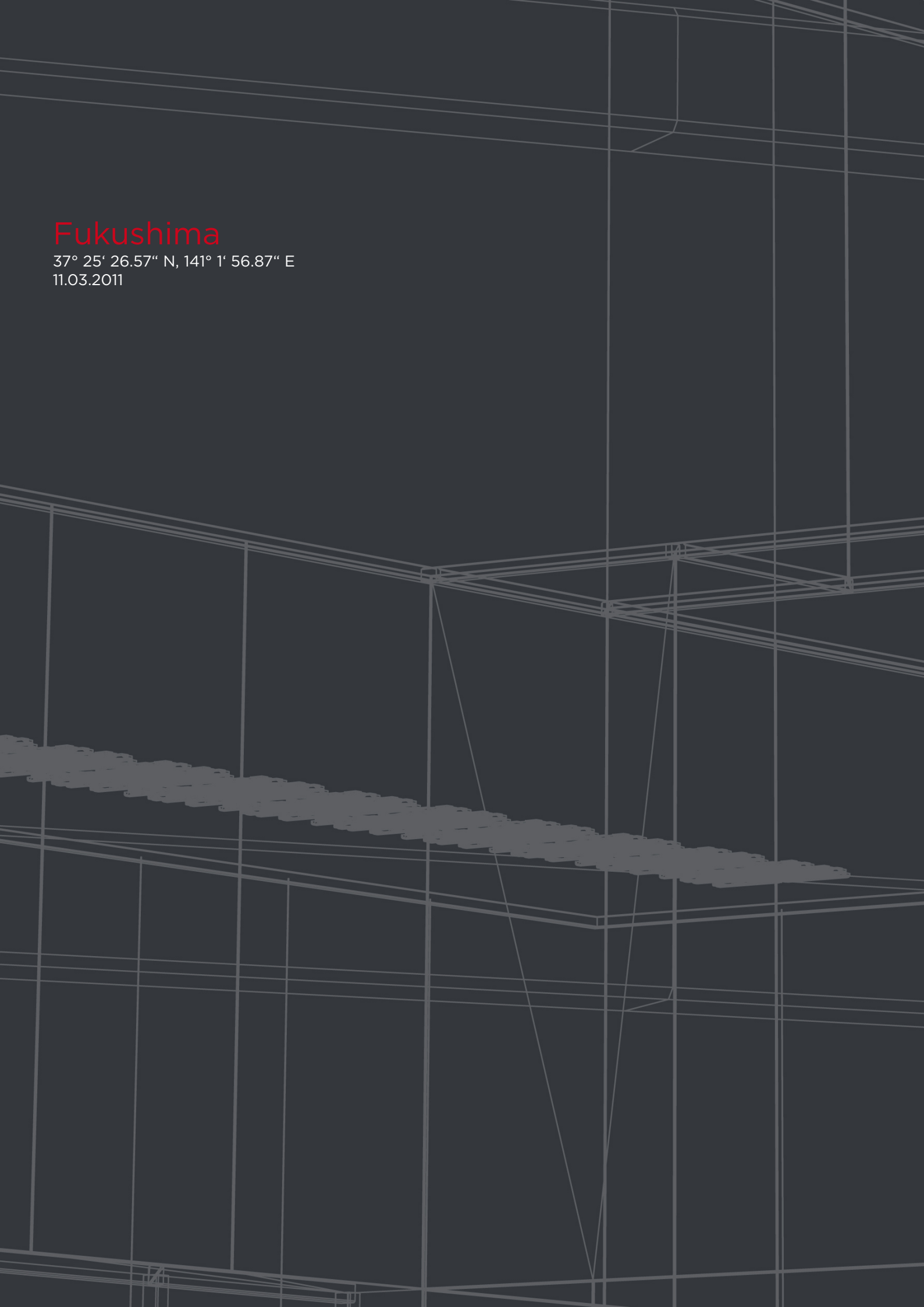
Jetzt legt das ENSI im Sinne eines Grundlagenpapiers einen Bericht in drei Teilen zu den Ereignissen in den beiden japanischen Kernkraftwerken Fukushima Dai-ichi (Fukushima I) und Fukushima Daini (Fukushima II) vor. Dies ist der erste Teil, eine detaillierte Chronologie.

Auf ensi.ch finden Sie auch den dazugehörigen Kommentar von Hans Wanner, Direktor ENSI: „Wissensmanagement ist das Kerngeschäft des ENSI“.

Am Montag 29. August wird das ENSI den 2. Teil seiner Fukushima-Analyse veröffentlichen: „Mensch und Organisation“ und in der zweiten Hälfte September den 3. Teil: „Lessons Learned“.

Fukushima

37° 25‘ 26.57“ N, 141° 1‘ 56.87“ E
11.03.2011



Inhaltsverzeichnis

1	**Ereignisablauf Fukushima Dai-ichi**	**6**
1.1	Ereignisablauf allgemein	6
1.2	Block 1	11
1.2.1	Reaktor	11
1.2.2	Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)	19
1.3	Block 2	20
1.3.1	Reaktor	20
1.3.2	Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)	24
1.4	Block 3	26
1.4.1	Reaktor	26
1.4.2	Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)	29
1.5	Block 4	30
1.6	Blöcke 5 & 6	33
1.7	Brennelement-Nasslager (Common Spent Fuel Pool)	34
1.8	Brennelement-Trockenlager (Dry Storage Cask Facility)	34
2	**Ereignisablauf Fukushima Daini**	**36**
2.1	Ereignisablauf allgemein	36
2.2	Block 1	39
2.3	Block 2	40
2.4	Block 3	41
2.5	Block 4	41
3	**Abkürzungen**	**44**
4	**Quellenangabe**	**46**

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Fukushima Dai-ichi Überblick vorher/nachher	6
Abb. 2	Tsunamiwarnung 11.03.2011 14:50 Uhr	7
Abb. 3	Geschätzte Tsunamihöhe 11.03.201 14:50 Uhr	7
Abb. 4	Vergleich geschätzte und gemessene Tsunamihöhen 11.03.2011	7
Abb. 5	Schnittdarstellung Höhen über NN, Blöcke 1-4	8
Abb. 6	Ausfall der Kühlwasserversorgung (Dai-ichi)	9
Abb. 7	Ausfall der Eigenbedarfsversorgung (Dai-ichi)	10
Abb. 8	Übersicht Ventingsystem Block 1	15
Abb. 9	Ansicht Block 1 nach der Wasserstoffexplosion	16
Abb. 10	Löschfahrzeuge zur Meerwassereinspeisung	17
Abb. 11	Füllstandsanzeige BWR Bsp. Block 1	21
Abb. 12	Ventingsystem Blöcke 2&3	22
Abb. 13	Trümmerbedeckung BE-Becken Block 3	29
Abb. 14	Ansicht Blöcke 3 & 4 nach den Wasserstoffexplosionen	30
Abb. 15	H2 Überströmen von Block 3 nach Block 4	31
Abb. 16	Lagerbecken Block 4 am 29.04.2011	32
Abb. 17	Fukushima Daini Überblick	36
Abb. 18	Überflutung Vergleich Dai-ichi & Daini	37

1 Ereignisablauf Fukushima Dai-ichi

1.1 Ereignisablauf allgemein

Vor Ereigniseintritt befanden sich die Blöcke des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi

Block 1
BWR/3, 1380 MW_{th} Mark I,
Hersteller: GE (1967 – 1971)

Block 2
BWR/4, 2381 MW_{th} Mark I,
Hersteller: GE/Toshiba (1969 – 1974)

Block 3
BWR/4, 2381 MW_{th} Mark I,
Hersteller: Toshiba (1970 – 1976)

im Leistungsbetrieb

Block 4
BWR/4, 2381 MW_{th} Mark I,
Hersteller: Hitachi (1973 – 1978)

Block 5
BWR/4, 2381 MW_{th} Mark I,
Hersteller: Toshiba (1972 – 1978)

Block 6
BWR/5, 3293 MW_{th} Mark II,
Hersteller: GE/Toshiba (1973 – 1979)

in Revision bzw. Umrüstung
(Block 4, Kernmanteltausch).

Der Betreiber dieser Anlagen ist TEPCO
(Tokyo Electric Power Company).

Abb. 1:
Fukushima Dai-ichi, Überblick vorher/nachher
Quelle: TEPCO

Als Folge des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens am 11.03.2011 um 14:46 Uhr (Magnitude M_W=9.0 auf der Momenten-Magnituden-Skala) wurden automatische Reaktorschnellab-schaltungen (RESA/SCRAM) der Blöcke 1-3 ausgelöst (vgl. Quelle 1).Ferner kam es zum Ausfall der externen Stromversorgung (Loss of Off-Site Power LOOP) und damit zum Verlust der Eigenbedarfsversorgung, was zum Containmentabschluss der Blöcke 1-3 sowie zum Start der Notstromdiesel führte (vgl. Quelle 1). Damit befanden sich die Anlagen kurz nach dem Erdbeben im „Notstromfall". Trotz der Erdbebenamplitude oberhalb der Anlagenauslegung verhielten sich die Anlagen bis dahin gemäss TEPCO (vgl. Quelle 26) auslegungsgemäss.

Am 11.03.2011 um 14:49 Uhr wurde von der Japan Meteorological Agency (JMA) eine Tsunami-Warnung herausgegeben (siehe Abbildung 2). Um 14:50 Uhr erfolgte die 1. Meldung der Ankunft und Höhe des Tsunamis (Fukushima Pref. am 11. März um ca. 15:10 Uhr wird mit einem etwa 3 m hohen Tsunami gerechnet, siehe Abbildung 3) (vgl. Quelle 27). In späteren Meldungen wurde die erwartete Tsunamihöhe durch JMA korrigiert (siehe Abbildung 4).

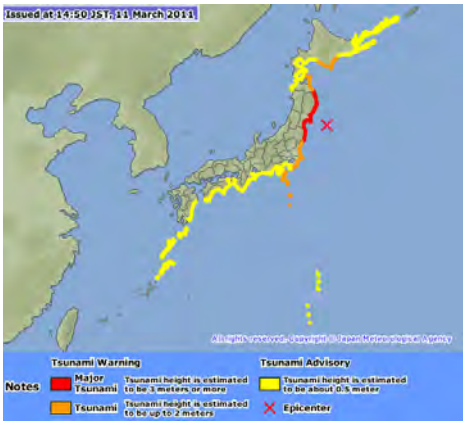


Abb. 2: Tsunamiwarnung 11.03.2011, 14:50 Uhr
Quelle: Siehe Abb. 3

Tsunami Forecast Region	Estimated Tsunami Arrival Time	Estimated Tsunami Height
IWATE PREF.	(*1)	3 m
MIYAGI PREF.	15:00 JST 11 Mar	6 m
FUKUSHIMA PREF.	15:10 JST 11 Mar	3 m
CENTRAL PART OF PACIFIC COAST OF HOKKAIDO	15:30 JST 11 Mar	1 m
PACIFIC COAST OF AOMORI PREF.	15:30 JST 11 Mar	1 m
IBARAKI PREF.	15:30 JST 11 Mar	2 m
KUJUKURI AND SOTOBO AREA, CHIBA PREF.	15:20 JST 11 Mar	2 m
IZU ISLANDS	15:20 JST 11 Mar	1 m
EASTERN PART OF PACIFIC COAST OF HOKKAIDO	15:30 JST 11 Mar	0.5 m
WESTERN PART OF PACIFIC COAST OF HOKKAIDO	15:40 JST 11 Mar	0.5 m

Abb. 3: Geschätzte Tsunamihöhe
11.03.2011, 14:50 Uhr
Quelle: Ausschnitt aus JMA (Japan Meteorogical Agency)

Tsunami Forecast Region	Estimated Tsunami Arrival Time and Height						Observed Tsunami Arrival Time and Height of Initial and Maximum Tsunami			
	Issued at 14:49* JST 11 Mar (3 minutes after the earthquake)		Updated at 15:14 JST 11 Mar (28 minutes after the earthquake)		Updated at 15:30* JST 11 Mar (44 minutes after the earthquake)		Initial Tsunami		Maximum Height Tsunami	
	Estimated Tsunami Arrival Time	Estimated Tsunami Height	Estimated Tsunami Arrival Time	Estimated Tsunami Height	Estimated Tsunami Arrival Time	Estimated Tsunami Height	Observed Time	Observed Tsunami Height	Observed Time	Observed Tsunami Height
PACIFIC COAST OF AOMORI PREF.	15 : 30	1m	Arrival of tsunami confirmed	3m	Arrival of tsunami confirmed	8m	Hachinohe 15 : 22	(-) 0.8m	Hachinohe 16 : 57	4.2m or higher
IWATE PREF.	Arrival of tsunami inferred	3m	Arrival of tsunami confirmed	6m	Arrival of tsunami confirmed	10m or higher	Kamaishi 14 : 45 Miyako 14 : 48 Ofunato 14 : 46	(-) 0.1m (+) 0.2m (-) 0.2m	Kamaishi 15 : 21 Miyako 15 : 26 Ofunato 15 : 18	4.1m or higher 8.5m or higher 8.0m or higher
MIYAGI PREF.	15 : 00	6m	Arrival of tsunami confirmed	10m or higher	Arrival of tsunami confirmed	10m or higher	Ayukawa 14 : 46	(+) 0.1m	Ayukawa 15 : 26	8.6m or higher
FUKUSHIMA PREF.	15 : 10	3m	Arrival of tsunami confirmed	6m	Arrival of tsunami confirmed	10m or higher	Soma 14 : 55	(+) 0.3m	Soma 15 : 51	9.3m or higher
IBARAKI PREF.	15 : 30	2m	15 : 30	4m	Arrival of tsunami inferred	10m or higher	Oarai 15 : 15	(+) 1.8m	Oarai 16 : 52	4.2m
KUJUKURI AND SOTOBO AREA, CHIBA PREF.	15 : 20	2m	15 : 20	3m	Arrival of tsunami confirmed	10m or higher	Choshi 15 : 13	(+) 0.5m	Choshi 17 : 22	2.4m

Abb. 4: Vergleich geschätzte und gemessene Tsunamihöhen 11.03.2011
Quelle: 43

Am 11.03.2011 um 15:27 Uhr erreichte die Welle das Kraftwerksgelände, um 15:35 Uhr wurden Teile des Kraftwerksgeländes durch eine zweite Welle überflutet (vgl. Quelle 44). Dies führte zur Zerstörung von Infrastruktur und Ausrüstungen sowie zum Verlust der ultimativen Wärmesenke (vgl. Quelle 1) und damit zum gemeinsamen Ausfall der Nebenkühlwasserversorgung (Common Cause Failure CCF) sowie zur Zerstörung der Kühlwasserpumpenhäuser. Weiterhin resultierte direkt aus der Überflutung der gemeinsame Ausfall (CCF) von Dieselgeneratoren und damit der Ausfall von sicherheitstechnisch wichtigen elektrischen Verbrauchern. Die Dieselgeneratoren der Blöcke 1 bis 5 waren alle auf der untersten Ebene des Maschinenhauses angeordnet. Der Ausfall der wassergekühlten Notstromdiesel wäre auch indirekt durch den Verlust der Kühlung (Nebenkühlwasserversorgung) erfolgt.

Der Ausfall der Netzversorgung und der Dieselaggregate führte zum kompletten Verlust der Wechselstromversorgung (Loss of AC-Power) und damit zum Station Blackout (SBO).

Am 11.03.2011 um 15:42 Uhr wurde für Fukushima Dai-ichi der Notstand ausgerufen (vgl. Quelle 44).

Anhand von Fotoaufnahmen vom 11.03.2011 ist gegen 15:57 Uhr zu erkennen, dass sich das Wasser zu diesem Zeitpunkt bereits wieder weitestgehend vom Anlagengelände zurückgezogen hatte (vgl. Quelle 31). Daraus resultiert ein Überflutungszeitraum von ca. 22 min.

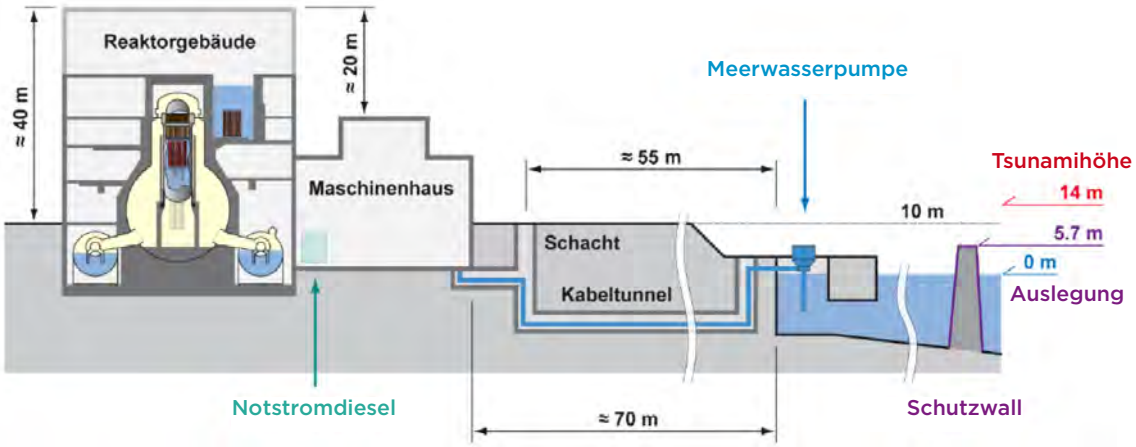


Abb. 5:
Schnittdarstellung Höhen über NN, Blöcke 1-4
Quelle: VGB

Der Tsunami-Schutzwall für Fukushima Dai-ichi wurde 2002 von der ursprünglichen Auslegung von 3.1 m (Bemessungs-Tsunami: Chile 1960 Magnitude 9.4, Höhe in Japan 3.2 m) auf eine maximale Wellenhöhe von 5.7 m nachgebessert. Mit einer Fundamenthöhe von 10 m ergibt sich daraus eine „Sicherheitsreserve“ von 4.3 m.

TEPCO hat nach Auswertung der Vor-Ort-Analysen gemeldet, dass es durch die Unfallfolgen zu Beschädigungen der Reaktordruckbehälter (RDB) sowie der Primärcontainments der Blöcke 1-3 gekommen ist (vgl. Quelle 33 sowie Quelle 42).
Die Temperatur im Primärcontainment des Blockes 1 betrug am 23.03.2011 noch ca. 400 °C (vgl. Quelle 33).

Anmerkung 1
Eine diversitäre Netzversorgung (Fremdnetz, externes Notnetz, etc.), welches über andere Stromtrassen geführt worden wäre, hätte ggf. die Unfallfolgen begrenzt.

Anmerkung 2
Eine diversitäre Wasserversorgung (Brunnen, Staubecken, etc.) hätte ggf. die Unfallfolgen minimiert.

Anmerkung 3
Eine gesicherte, räumliche Trennung innerhalb des Kühlwasserpumpenhauses hätte ggf. die nuklearen Nebenkühlwassersysteme besser schützen können.

Anmerkung 4
Ein besserer Überflutungsschutz der Notstromdiesel (Bunkerung, höhere Anord nung) hätte ggf. die Unfallfolgen minimiert.

Anmerkung 5
Die im Rahmen von OSART- und WANO-Missionen durchgeführten Reviews hätten Schwachstellen in der Anlage erkennen müssen. (Abkürzungen: siehe Kapitel 3)
Ein direkter Bezug zur Auslegung ist im Rahmen der Reviews nicht gegeben. Allerdings können indirekt, im Rahmen der «Operating Experience» (OE) z. B. bei OSART-Missionen, durch die IRS-Reports (z. B. 7342 oder 7788) oder bei WANO-Missionen durch die Significant Operating Experience Reports (SOER) über wichtige Betriebserfahrungen der Mitgliedsunternehmen, die Auslegung und Nachrüstung der Anlage hinterfragt werden. Die WANO-Mitgliedsunternehmen haben sich verpflichtet, die Empfehlungen der WANO – SOER spezifisch zu prüfen und die daraus ggf. abgeleiteten Massnahmen bei Peer Reviews überprüfen zu lassen. Dies ist eine Eigenverpflichtung der Betreiber, und eine Transparenz nach aussen gibt es nicht. Bei OSART sieht es etwas anders aus, allerdings fehlt dort die Verpflichtung aller Länder über die IAEA alle daraus abzuleitenden allfälligen Massnahmen im Hinblick auf die Sicherheit auch durchzusetzen. Im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen sollte der Anlagenstatus alle 10 Jahre überprüft werden. Auch dort gibt es international unterschiedliche Vorgehensweisen und Massstäbe. Diese drei Instrumente zusammen könnten im Rahmen eines verpflichtenden, kontinuierlichen Prozesses das Sicherheitsniveau von kerntechnischen Anlagen weltweit erhöhen.

Abb. 6:
Ausfall der Kühlwasserversorgung (Dai-ichi)
Quelle: Uni Japan

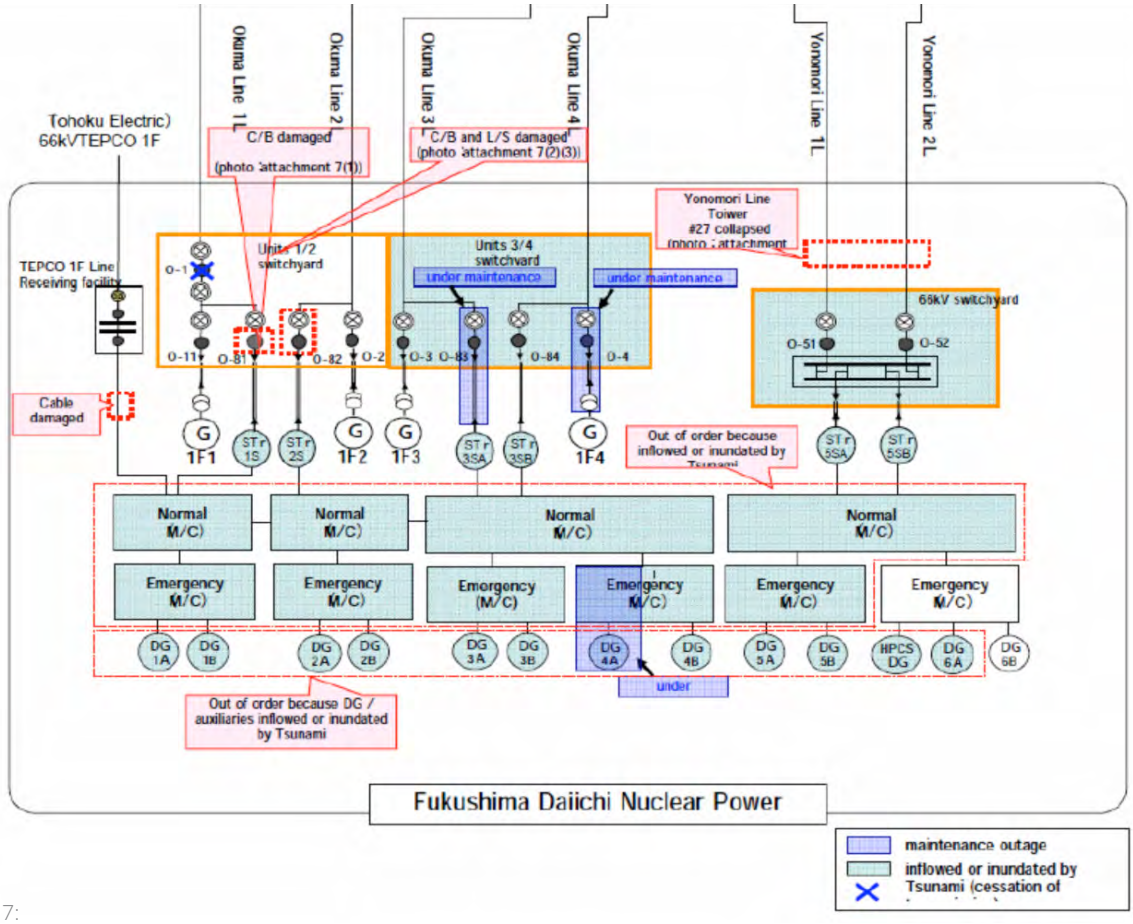


Abb. 7:
Ausfall der Eigenbedarfsversorgung (Dai-ichi)
Quelle: TEPCO

1.2 Block 1

1.2.1 Reaktor

Nach der Reaktorschnellabschaltung (SCRAM) und dem durch den Verlust der externen Stromversorgung (Loss of Off-Site Power LOOP) ausgelösten Notstromfall (14:47 Uhr – vgl. Quelle 44) erfolgte im Block 1 die Nachwärmeabfuhr vorerst auslegungsgemäss über den Isolation Condenser (IC) (vgl. Quelle 2), mit automatischem Start um 14:52 Uhr (vgl. Quelle 44).

Die Kühlwassernachspeisung über das High Pressure Coolant Injection System (HPCI) war verfügbar zur Kühlmittelnachspeisung bei sinkendem RDB-Füllstand (vgl. Quelle 44). Aufgrund der starken Temperaturtransiente mit Druckabfall von 70 auf ca. 45 bar wurde ca. 10 min. nach dem Ereigniseintritt der Isolation Condenser von Hand abgeschaltet (15:03 Uhr - vgl. Quelle 44), um den gemäss Betriebsvorschriften vorgegebenen maximalen Abfahrgradienten von $\Delta t \leq 55$ K/h einzuhalten (vgl. Quelle 26). Ein Strang (Strang A) des IC wurde zur RDB-Druckregelung genutzt (vgl. Quelle 44). Zu einem Kühlmittelverlust-Störfall (KMV) als direkte Folge des Erdbebens soll es gemäss Angaben von TEPCO (vgl. Quelle 26) nicht gekommen sein.

Durch die Ausserbetriebnahme des Isolation Condensers kam es in Folge zum Druckanstieg und zu einer Reaktordruckbegrenzung zwischen ca. 60 und 70 bar, der RDB wurde im Hochdruckpfad (heiss abgestellt) belassen (vgl. Quelle 44). Im Hochdruckbereich wäre die erforderliche Kühlmittelnachspeisung über das HPCI erfolgt. Der Reaktorfüllstand erreichte jedoch das automatische Anregekriterium für den Start des HPCI (LL: 148 cm unter Unterkante Dampfabscheider) nicht (vgl. Quelle 43).

Am 11.03.2011 um 15:35 Uhr kam es in Folge der zweiten Tsunami-Welle zur Zerstörung des Kühlwassereinlaufbauwerks und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke durch mechanische Einwirkung. Zusätzlich kam es durch den Ausfall der Notstromdiesel (Überflutung) zum Ausfall der notwendigen Stränge zur Nachwärmeabgabe an die ultimative Wärmesenke (Meerwasserkühlung) und um 15:37 Uhr zum Station Blackout (SBO) (vgl. Quelle 43). Damit war nur noch der Torus zur Aufnahme der Nachwärme vorhanden (der Isolation Condenser wurde vor der Überflutung manuell ausser Betrieb genommen).

Durch den gleichzeitigen Ausfall der Notstromversorgungen von Block 1 + 2 (Diesel und Querverbindungen) war eine Stützung des Blocks 1 durch Block 2 nicht möglich (vgl. Abschnitt IV-39 Quelle 43).

Aufgrund der Nichtverfügbarkeit der Anzeigen im Kontrollraum ging Tepco von einem Funktionsverlust des HPCI aus. Die Anzeigen zur Ventilstellung des IC waren ebenfalls nicht mehr verfügbar (vgl. Quelle 44).

Infolge der anhaltenden Nachzerfallsleistung, der fehlenden Nachwärmeabfuhr durch den IC und der fehlenden Kühlmittelnachspeisung kam es zur Abnahme des Füllstands im Reaktordruckbehälter (RDB), eine Abdeckung der Brennelemente (BE) war die Folge. Die Druckbegrenzung erfolgte wahrscheinlich über die Druckbegrenzungsventile in die Kondensationskammer (Torus), nähere Informationen liegen derzeit jedoch nicht vor. Dies führte in Folge der noch abzuführenden Nachzerfallsleistung zu einem Temperaturanstieg im Torus und, ab Erreichen der Siedetemperatur im Torus, zu einem Druckanstieg im Torus und Drywell. Ob eine automatische

Druckentlastung des RDB durch den tiefen Füllstand stattgefunden hat, ist derzeit nicht bekannt. Durch den Ausfall der Gleichstromversorgung durch Batterien ist eine Störung im Bereich der Leittechnikfunktionen anzunehmen (Ausfall der Schreiberaufzeichnung der Kernüberwachung).

Anmerkung 6
Ob Handeingriffe während der ersten 30 Minuten sinnvoll waren, ist zu klären. Durch die Handmassnahme „Abschaltung des Isolation Condensers“ wurde die Druckentlastung des RDB unterbrochen, und die Anlage gelangte wieder in den Hochdruckpfad. Ziel im Notstandsfall muss sein, die Anlage in einen drucklosen, gefluteten und damit nachkühlfähigen Zustand zu bringen. Durch die Meldung einer erwarteten Flutwelle von 3 m (wobei sich das Kraftwerk Fukushima Dai-ichi an der Grenze zur Region Miyagi mit einer Warnung von 6 m (vgl. Quelle 27) befindet) bestand nicht direkt der Grund, den RDB-Druck schnell zu entlasten und den RDB zu fluten. Dies hätte sicherlich zu einem milderen Ereignisablauf geführt. Die Tsunamimeldungen der JMA wurden um 15:14 Uhr bzw. 15:30 Uhr aktualisiert (siehe Abbildung 4).

Der Anschluss der „Power Supply Vehicle“ zur Batterieunterstützung hat nicht sofort funktioniert bzw. der Zugang wurde durch Trümmer erschwert (vgl. Quelle 6).

Anmerkung 7
Die Durchführung der Notfallmassnahmen konnte nicht sofort vollzogen werden. Die dafür notwendigen „Power Supply Vehicles“ waren vorhanden und einsatzbereit. Ein Grund könnte in der teilweisen Zerstörung von Schaltanlagen liegen. Es könnte auch ein Grund beim fehlenden Training von Notfallmassnahmen vermutet werden, da TEPCO kurz nach dem Unfall für alle seine Anlagen Trainings in diesem Bereich veranlasst hat (Bsp. Daini vgl. Quelle 41).

Am 11.03.2011 um 15:50 Uhr erfolgte der Verlust der Stromversorgung für die Instrumentierung (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 um 16:36 Uhr kam es für ca. 10 min. zum Ausfall der RDB-Füllstandsüberwachung (vgl. Quelle 28), um 17:07 Uhr dann zum Totalausfall der RDB-Füllstandsüberwachung (vgl. Quelle 44).

Anmerkung 8
Der Grund des Ausfalls der RDB-Füllstandsmessung kann in den Problemen der Energieversorgung gesehen werden. Mit einer wieder funktionierenden RDB-Füllstandsüberwachung hätte der tiefe RDB-Füllstand erkannt werden müssen. Es ist nicht bekannt, ob eine manuelle, schnelle Druckentlastung des RDB durchgeführt wurde. Da der RDB-Füllstand zu diesem Zeitpunkt schon tief gewesen sein muss, hätte vermutlich nach Betriebshandbuch eine Druckentlastung durchgeführt werden müssen. Falls elektrische Ansteuerungsmöglichkeiten der Druckentlastungsventile (Safety Relief Valves SRV) nicht mehr gegeben waren, müssten Notfallprozeduren dafür vorhanden sein. Für die Notfallmassnahme „externe Wasserversorgung“ ist eine Druckentlastung notwendig.

Am 11.03.2011 um 17:12 Uhr berät der Notfallstab über eine alternative Wassereinspeisung in den RDB über die Leitungen des Feuerlöschsystems in das Kernsprühsystem. Eine dieselbetriebene Feuerlöschpumpe ist um 17:30 Uhr im Stand-by Betrieb vorhanden, die dafür erforderlichen Ventile des Kernsprühsystems wurden von Hand gestellt. Die Einspeisung wäre ab einem RDB-Druck von ca. 6.9 bar möglich (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 von 18:18 Uhr bis 18:25 Uhr wurde ein Strang (Strang A) des Isolation Condensers geöffnet (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 um 20:07 Uhr wurde ein RDB-Druck von 69 bar vor Ort abgelesen (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 um 20:49 Uhr war temporär die Beleuchtung im Hauptkontrollraum wieder hergestellt (vgl. Quelle 44)

Am 11.03.2011 um 21:00 Uhr wurde die Bereitschaft zur Wassereinspeisung in den RDB mit weiteren Feuerlöschpumpen hergestellt (vgl. Quelle 6).

Am 11.03.2011 um 21:19 Uhr war die Gleichstromversorgung der RDB-Füllstandsmessung kurzzeitig vorhanden, die Füllstandsanzeige zeigte zu dem Zeitpunkt +200mm über Kernoberkante (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 um 21:30 Uhr wurde wiederum ein Strang (Strang A) des IC geöffnet (vgl. Quelle 44). Ob und wie diese Massnahme gewirkt hat, ist unklar. Gemäss JAIF - Earthquake Report vom 18.08.2011 wurde der IC ca. 5 Stunden nach dem Ereigniseintritt vor Ort von Hand geschlossen, ohne dass der Schichtleiter davon Kenntnis hatte (vgl. Quelle 47).

Am 11.03.2011 wurde seitens TEPCO vermutet, dass um 21:40 Uhr der Füllstand auf Kernoberkante absinken werde und dass gegen 22:20 Uhr mit ersten Kernschäden zu rechnen sei (vgl. Quelle 6). Aufgrund dieser Vermutung wurde im Block 1 am 11.03.2011 um 20:50 Uhr seitens der Regierung die Evakuierungsvorwarnung der 2-km-Zone um das Kraftwerk Dai-ichi ausgelöst (vgl. Quelle 3). Laut neueren Einschätzungen (siehe Quelle 33) erreichte der Füllstand die Kernoberkante bereits 3 h nach dem SCRAM, d.h. um ca. 17:50 Uhr, sowie die Kernunterkante nach ca. 4.5 h nach dem SCRAM (ca. 19:20 Uhr).

Am 11.03.2011 um 21:23 Uhr wurde aufgrund der Zuspitzung in Block 1 von der Regierung die Evakuierung der 3-km-Zone und der Aufenthalt im Haus in der 10-km-Zone um das Kraftwerk Dai-ichi verfügt (vgl. Quelle 3).

Anmerkung 9
Wieso nicht mit der Einspeisung von Wasser zur Kühlmittelergänzung in den RDB begonnen werden konnte, ist nicht gänzlich geklärt. Zu diesem Zeitpunkt (ca. 5 h nach der Anlagenüberflutung) waren schon alle zur Einspeisung notwendigen Systeme ausgefallen. Ferner war eine schnelle Wiederherstellung der Energieversorgung und der Kühlwasserversorgung absehbar nicht gegeben (Überflutung Notstromdiesel, Zerstörung Kühlwasserpumpenhaus). Zudem lag die Kompetenz zur Durchführung dieser Massnahme – im Gegensatz zum Containment Venting – wahrscheinlich beim Betreiber.

Am 11.03.2011 um 21:51 Uhr wurde der Zugang zum Reaktorgebäude aufgrund zu hoher Ortsdosisleistung untersagt. Um 23:00 Uhr wurde im Maschinenhaus am Zugang zum Reaktorgebäude (double door, northside, 1st floor) eine Ortsdosisleistung von 1.2 mSv/h gemessen (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 gegen Mitternacht bzw. am frühen Morgen des 12.03.2011 trafen mehrere Power Supply Vehicles von anderen Standorten ein (vgl. Quelle 44). Die Ankunft mehrerer Hoch- und Niederspannungs-Versorgungsfahrzeuge wurde durch Verkehrsstaus sowie Zerstörungen der Strassen und Infrastrukturen verzögert. Versuche, die Maschinen mit Helikoptern der Streitkräfte zu transportieren, scheiterten am Gewicht der Aggregate (vgl. Quelle 44).

Am 12.03.2011 um 00:49 Uhr begann der Druckaufbau im Primärcontainment (laut Quelle 44 ist der Drywell (DW)-Druck zu dem Zeitpunkt bereits >6 bar abs. (11.03.2011 um 23:50 Uhr)). Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Nachzerfallsleistung noch ca. 0,8 % der thermischen Nennleistung von 1380 MW. Ein Kühlmitteleintrag in den RDB fand nicht mehr statt. Die Nachzerfallsleistung wurde wahrscheinlich direkt über die Druckbegrenzungsventile in die Kondensationskammer (Torus) geleitet. Aufgrund der nicht mehr vorhandenen Wärmeabfuhrmöglichkeit vom Torus zur ultimativen Wärmesenke „Meer“ stieg der Primärcontainmentdruck (Drywell) kontinuierlich an. Gleichzeitig nahm der RDB-Füllstand kontinuierlich ab, da keine Einspeisung von Kühlmittel in den RDB erfolgte.

Die Oxidation der abgedeckten Zirkonium-Brennstab-Hüllrohre der Brennelemente unter Dampfatmosphäre resultierte in der Bildung von Wasserstoff ($Zr + {}_2 H_2O\ ZrO_2 + {}_2 H_2$). Dieser wurde während des Druckausgleichs über den Torus in den Drywell transportiert und konzentrierte sich im Bereich des Deckels des Drywells. Durch Leckagen, wahrscheinlich begünstigt durch den hohen Drywell-Druck, kam es zur Akkumulation von Wasserstoff (H_2) im Reaktorgebäude (siehe auch Quelle 43). Der Druck im Drywell stieg über den Auslegungsdruck von 50-60 psig (ca. 3.45-4.14 bar, vgl. Quelle 34). Vermutlich kam es zum Versagen des Deckels oder der Deckeldichtung des Drywells, dies lässt sich aber derzeit nicht abschliessend belegen.

Am 12.03.2011 um 01:48 Uhr kommt es zum Ausfall der dieselbetriebenen Feuerlöschpumpe (in Stand-by Betrieb), ein Neustart nach Betankung und Wechsel der Starterbatterie blieb erfolglos. Es wurden Vorbereitungen zum Anschluss von Löschfahrzeugen an die Feuerlöschleitungen getroffen. Aufgrund der Zerstörung eines Fahrzeuges durch den Tsunami und die Nichtpassierbarkeit der Verbindungsstrassen zu den Blöcken 5 und 6 war zu Beginn nur ein Fahrzeug verfügbar (vgl. Quelle 44).

Der sehr hohe Druck im Primärcontainment, der ca. das Doppelte des Auslegungsdruckes erreicht hatte, machte eine Druckentlastung des Primärcontainments (Venting) notwendig. Dieses ist erforderlich, um ein unkontrolliertes Überdruckversagen des Primärcontainments zu verhindern.

Am 12.03.2011 um 01:30 Uhr wird die Freigabe zur Durchführung des Venting beim Premierminister, bei NISA und METI angefragt. Die Erlaubnis seitens METI und des Headquarters Task Force wird unter Vorbehalt im Hinblick auf die noch nicht abgeschlossene Evakuierung um 03:00 Uhr erteilt (vgl. Quelle 44).

Um 03:06 Uhr wird seitens TEPCO die Vorbereitung einer gefilterten Druckentlastung im Rahmen einer Pressekonferenz angekündigt (vgl. Quelle 3). Am 12.03.2011 gegen 03:00 Uhr lag der Druck im Primärcontainment gemäss Diagrammen von NISA und JAIF schon über dem Auslegungsdruck und erreichte Werte zwischen 6 und 8,4 bar (in Quelle 44 wird der DW-Druck von 8.4 bar um 02:30 Uhr bestätigt).

Am 12.03.2011 um 05:00 Uhr wird die Nutzung von Vollschutzmasken mit Aktivkohlefilter für das Personal im Kontrollraum angeordnet. Aufgrund steigender Ortsdosisleistung im Kontrollraum von Block 1 wird das Wartenpersonal nach Block 2 verlegt (vgl. Quelle 44).

Am 12.03.2011 um 05:44 Uhr wird die Evakuierung der 10-km-Zone um das Kraftwerk seitens der Regierung verfügt (vgl. Quelle 3). Am 12.03.2011 um 08:03 Uhr kündigt der Kraftwerksleiter den Beginn des Ventings für 09:00 Uhr an.

Am 12.03.2011 um 09:04 Uhr werden zwei Operateure vor Ort geschickt, um das Hauptventil vor der Berstscheibe (MO210) manuell um 25 % zu öffnen, dies war um 09:15 Uhr erfolgt. Um 09:24 Uhr wurde eine 2. Gruppe vor Ort geschickt, um das „kleine“ Ventil zur Torus-Druckentlastung (AO90) zu öffnen. Aufgrund der hohen Ortsdosisleistung (ODL) wird diese Arbeit gegen 09:30 Uhr abgebrochen. Im Rahmen dieser Vorbereitungsarbeiten zum Venting akkumulierte ein Mitarbeiter eine Dosis von > 100 mSv (vgl. Quelle 3). Das Öffnen vor Ort wird aufgrund der hohen ODL abgebrochen und es wird versucht, die Ventile mittels Druckluft vom Kontrollraum aus zu öffnen. Zwischen 10:17 Uhr und 11:15 Uhr wurde versucht, das Ventil AO90 zu öffnen (vgl. Quelle 44).

Daraufhin wurde am 12.03.2011 um 14:00 Uhr ein Kompressor zum Öffnen des „grossen“ Ventils AO72 zur Torus-Druckentlastung angeschlossen (vgl. Quelle 44).

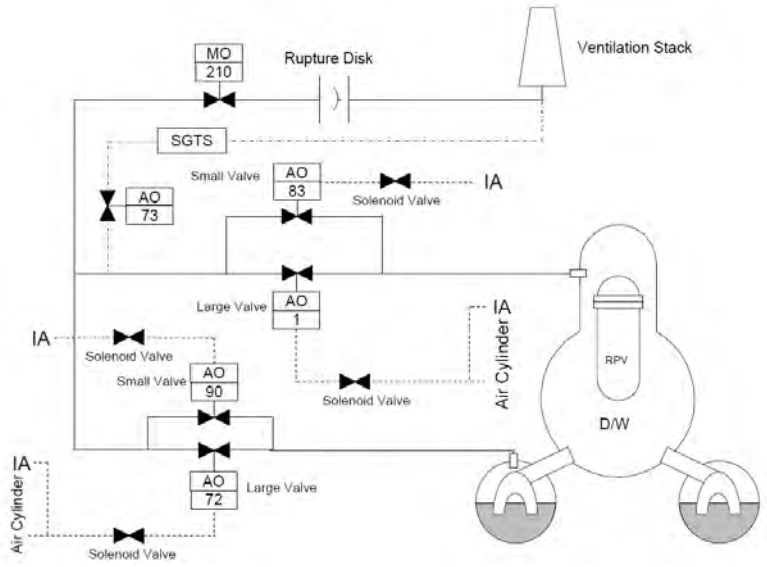


Abb. 8:
Übersicht Ventingsystem Block 1
Quelle 43

Die Entlastung wurde laut Quelle 4 am 12.03.2011 um 14:30 Uhr erfolgreich durchgeführt, der Drywell-Druck ging laut Quelle 44 von 7.5 bar auf 5.8 bar zurück.

Die relativ grosse Zeitdifferenz zwischen Vorbereitung und Beginn des Ventings ist zum Teil technisch (Vorbereitungen, Materialbeschaffung, Training) als auch administrativ (Evakuierung, Kommunikation, Freigabe) begründet.

Anmerkung 10
Das Ventingsystem ist bei den GE-Anlagen als „aktives“ System ausgelegt. Zum Öffnen der Ventile wird eine Hilfsenergie benötigt. Durch die Folgen der Überflutungen war diese nicht

mehr vorhanden. Durch die hohe Ortsdosisleistung (gilt auch für KMV innerhalb Drywell) war der Zugang zum manuellen Öffnen der Armaturen erschwert. Vermutlich waren keine dosisminimierenden Massnahmen für die Bedienmöglichkeiten vor Ort vorhanden, um die Ventingarmaturen manuell öffnen zu können.

Gemäss Angaben von TEPCO (vgl. Quelle 44) wurden bis zum 12.03.2011, 14:53 Uhr mittels einer mobilen Pumpe über den Feuerlöschanschluss ca. 80.000 l Frischwasser in den Reaktor nachgespeist. Diese Menge deckt die zur Nachwärmeabfuhr benötigte Nachspeisung nicht ab.

Am 12.03.2011 gegen 15:30 Uhr wurde die Stromversorgung für das Notboriersystem, ein Hochdrucksystem, über den Anschluss eines Power Supply Vehicle an die HV-Verteilung von Block 2 hergestellt. Um 15:36 Uhr waren die Vorbereitungen für die Wassereinspeisung über das Notboriersystem abgeschlossen (vgl. Quelle 44).

Am 12.03.2011 um 15:36 Uhr ereignete sich eine Wasserstoffexplosion im oberen Teil des Reaktorgebäudes, welche eine Beschädigung der Gebäudestruktur zur Folge hatte. Wie es zur Zündung des im Reaktorgebäude angesammelten Wasserstoffs kam, ist derzeit offen. Es wird vermutet, dass ein Nachbeben (vgl. Quelle 5) einen Funkenschlag ausgelöst hat, welcher zur Zündung des Wasserstoffs führte. Als weitere Möglichkeit einer Zündquelle könnte die wiederhergestellte Stromversorgung (Kurzschluss, Überspannung) des Notboriersystems gesehen werden.

Die Detektion von radioaktivem Cäsium auf dem Kraftwerksgelände nach dem Venting (12.03.2011, 14:49 Uhr - vgl. Quelle 1) sowie der Anstieg der Dosisleistung nach der

Abb. 9:
Ansicht Block 1 nach der Wasserstoffexplosion
Quelle: TEPCO

Explosion sind Belege für BE-Schäden bzw. eine Kernschmelze. TEPCO geht derzeit davon aus, dass bereits gegen 06:50 Uhr am 12.03.2011 nahezu alle BE durch die Kerschmelze betroffen waren (vgl. Quelle 10). Laut der neueren Abschätzung (siehe Quelle 33) sind 16 h nach dem SCRAM alle BE geschmolzen, die Schmelze hat sich im unteren Teil des RDB gesammelt.

Am 12.03.2011 um 18:25 Uhr wird, als Folge der Wasserstoffexplosion und des Anstiegs der Ortsdosisleistung auf dem Kraftwerksgelände, die Evakuierung der 20-km-Zone um das Kraftwerk und der Aufenthalt im Haus in der 30-km-Zone verfügt (vgl. Quelle 1).
Am 25.03.2011 rät die Regierung laut Quelle 1 der Bevölkerung zu einer freiwilligen Evakuierung innerhalb der 30-km-Zone um das Kraftwerk.

Am 12.03.2011 um 19:04 Uhr wird mit der Einspeisung von Meerwasser mittels dreier in Reihe geschalteter Löschfahrzeuge begonnen (siehe Abbildung 10).

Am 12.03.2011 um 20:45 Uhr wird mit der Einspeisung von boriertem Meerwasser über Feuerlöschleitungen in den RDB begonnen (vgl. Quelle 3). Wieso es zu der relativ grossen Zeitdifferenz zwischen Bereitschaft und Beginn der Einspeisung kam, ist derzeit unklar. Es wird vermutet, dass diese Zeitspanne administrativ bedingt war und dass erst nach Erlass einer Direktive durch Regierungsvertreter am 12.03.2011 um 19:55 Uhr (vgl. Quelle 3) und Freigabe durch die Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) am 12.03.2011 um 20:05 Uhr mit der Meerwassereinspeisung begonnen wurde. Aufgrund der Erkenntnisse in Quelle 43 und Quelle 44 wurde die Meerwassereinspeisung dann ohne behördliche Anordnung durchgeführt. Gemäss Quelle 43 ist dies auf Kommunikationsdefizite zurückzuführen. Ob die Meerwassereinspeisung in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert ist, ist derzeit nicht bekannt.

Anmerkung 11
Die grossen Zeitdifferenzen bei der Meerwassereinspeisung und die Verzögerungen beim Venting sind nicht eindeutig erklärbar. Wenn es an den langen Entscheidungswegen gelegen hat, ist zu prüfen, wie die Entscheidungsfindung in Extremsituationen geregelt ist. Ab wann dürfen die Mitarbeiter auf der Anlage selbst entscheiden? Wann sind Freigaben durch andere Entscheidungsträger notwendig? Wie wird dabei gewährleistet, dass die Entscheide rechtzeitig gefällt werden?

Abb. 10:
Löschfahrzeuge zur Meerwassereinspeisung
Quelle 44

Am 20.03.2011 konnte die externe Stromversorgung über Block 2 wieder hergestellt werden (vgl. Quelle 40). Die permanente Beleuchtung im Kontrollraum wurde am 24.03.2011 um 11:30 Uhr wieder hergestellt (vgl. Quelle 12).

Gemäss gestaffelter Sicherheitsvorsorge (Defence-in-Depth) sind im Ablauf als wesentliche Ereignispunkte für den Block 1 aufzuführen:

- Die Notwendigkeit von Handeingriffen in Sicherheitssysteme 10 min nach Ereigniseintritt ist zu hinterfragen. International gilt das 30-min-Kriterium (aus dem TMI-Ereignis von 1979, keine Operateureingriffe vor 30 min).

- Notstromfall und Verweilen im „Hochdruckpfad“: Ziel muss sein, die Anlage in den Abfahrkühlbetrieb zu bringen und nicht im Zustand „Hot Standby“ stehen zu bleiben. Ein Standardsimulatortrainingsprogramm beinhaltet den „Notstromfall“ und auch den „Station Blackout“. Welche Schulungsprogramme und Schulungsinhalte in Japan für kerntechnische Anlagen vorgegeben sind und ob TEPCO über anlagenspezifische Simulatoren für seine Kernkraftwerke verfügt, ist derzeit nicht bekannt.

- Überflutung der Anlage durch den Tsunami: Auslegungsüberschreitendes Ereignis.

- Nach der Überflutung der Anlage wurden zwar die wesentlichen Notfallmassnahmen getroffen bzw. vorbereitet. Mit der Sicherstellung der Batterieversorgung wurde kurz nach der Überflutung begonnen, und die Einspeisemöglichkeit in den RDB war ca. 6 h nach Ereigniseintritt vorbereitet. Dabei gab es aber Probleme bei der Durchführung der Notfallmassnahme “Anschliessen des Power Supply Vehicle“. Die Einspeisung in den RDB vor Erreichen der Kernoberkante konnte nicht ausreichend durchgeführt werden, obwohl die Zerstörung der ultimativen Wärmesenke und der Totalverlust der Notstromdiesel zu diesem Zeitpunkt bekannt gewesen sein mussten.

- Durch die nicht erfolgte Kühlmittelnachspeisung und die weiterhin erforderliche Wärmeabfuhr kam es zum Druckaufbau im Primärcontainment. Es traten, wie schon bei der Wassereinspeisung, Zeitverzögerungen bis zur Durchführung des Ventings auf.

Damit haben im Rahmen der gestaffelten Sicherheitsvorsorge nach der Anlagenüberflutung mindestens drei technisch-/organisatorische Barrieren zur Verhinderung bzw. Minimierung der Störfallfolgen versagt. Inwieweit funktionsübergreifende Tätigkeiten aufgrund der Mehrblockanlage (Schicht, Notfallstab, Instandhaltung, etc.) eine Rolle gespielt haben könnten, ist derzeit nicht geklärt.

1.2.2 Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)

Aufgrund des SBO kam es im Block 1 zum Ausfall der Brennelementlagerbeckenkühlung. Durch die Wasserstoffexplosion am 12.03.2011 um 15:36 Uhr im Reaktorgebäude hat das Lagerbecken eine direkte Verbindung zur Atmosphäre. Aufgrund der fehlenden Kühlung führte dies zu einem Anstieg der Wassertemperatur und zu einem Absinken des Füllstands im Lagerbecken durch Verdampfung. Der letzte Brennelementwechsel für den Block 1 fand ab 27.09.2010 im Rahmen der Revisionsabstellung 2010 statt.

Am 31.03.2011 von 13:03 Uhr bis 16:04 Uhr wurde erstmals mittels einer mobilen Autobeton-Pumpe Frischwasser in das BE-Becken nachgespeist.

Über den Zustand der 392 BE sowie des BE-Beckens ist derzeit nichts bekannt. Ob Teile der Brennelementlademaschine oder Teile des Gebäudekrans durch die Explosion oder durch das Erdbeben in das Lagerbecken gefallen sind, ist nicht bekannt. Durch die erheblichen Schuttablagerungen (vgl. Abbildung 9) ist keine Aussage über den derzeitigen Zustand möglich.

1.3 Block 2

1.3.1 Reaktor

Nach der Reaktorschnellabschaltung um 14:47 Uhr und dem durch den Verlust der externen Stromversorgung ausgelösten Notstromfall erfolgte im Block 2 die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das manuell in Betrieb genommene Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC), ein System, das mit dem im Reaktor erzeugten Dampf betrieben wird und das keine Wechselspannungsversorgung benötigt. Aufgrund des Signals „Reaktorfüllstand hoch“, wurde das RCIC mehrfach automatisch abgeschaltet. Wassereinspeisung aus dem Torus und aus dem Kaltkondensatbehälter ermöglichten einen Erhalt dieser Fahrweise bis zum 14.03.2011 gegen ca. 12:00 Uhr (vgl. Quelle 43), um 13:25 Uhr wurde der Verlust der Reaktorkühlung gemeldet (vgl. Quelle 7).

Am 11.03.2011 um 15:35 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke. Ferner kam es aufgrund des Ausfalls der Notstromdiesel durch Überflutung zum Ausfall der notwendigen Stränge zur Nachwärmeabgabe an die ultimative Wärmesenke (Meerwasserkühlung) und zum SBO. Damit war nur noch der Torus zur Aufnahme der Nachwärme vorhanden.

Am 11.03.2011 um 15:39 Uhr, 4 min nach der zweiten Tsunamiwelle, wurde das RCIC manuell in Betrieb genommen (vgl. Quelle 44).

Am 11.03.2011 um 20:49 Uhr war temporär die Beleuchtung im Hauptkontrollraum wieder hergestellt. Um 21:50 Uhr wurde ein RDB-Füllstand von +3400 mm über Kernoberkante gemessen, um 23:25 Uhr betrug der Druck im Drywell 1.41 bar_{abs} (vgl. Quelle 44).

Am 12.03.2011 um 02:55 Uhr wurde bestätigt, dass das RCIC in Betrieb ist, und die Priorität bei der Durchführung der Druckentlastung wurde auf Block 1 gelegt. Laut Quelle 43 wurde die Kühlmittelnachspeisung vom Kondensatvorratsbehälter auf den Torus umgestellt. Am 12.03.2011 um 17:30 Uhr weist der Kraftwerksleiter an, mit den Vorbereitungen zur Druckentlastung zu beginnen (vgl. Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 08:10 Uhr wurde das Hauptventil vor der Berstscheibe (MO271) um 25 % geöffnet (siehe Abbildung 12). Um 11:00 Uhr war das „grosse“ Ventil (AO205) zur Torus-Druckentlastung geöffnet, die Druckentlastung des Primärcontainments war somit bis zur Berstscheibe durchgeschaltet. Gemäss Quelle 44 liegt der Ansprechdruck bei 4.27 bar (Überdruck), entsprechend 5.28 $bar_{abs.}$

Durch die Störung bzw. den Ausfall der Batterieversorgung ist eine Störung im Bereich der Leittechnikfunktionen anzunehmen (Ausfall der Schreiberaufzeichnung der Kernüberwachung). Ferner ist ein Augenmerk auf die RDB-Füllstandsanzeigen (siehe Abbildung 11) zu legen. Da es sich hierbei um Differenzdruckmessungen handelt, könnte es zu Ausdampfungen oder unterkühltem Sieden in den Messsäulen gekommen sein. Ob diversitäre Messungen (z. B. Kerninnentemperaturen oder Kernaustrittstemperaturmessungen) verfügbar waren, ist derzeit nicht bekannt.

Wesentlich ist, dass nach den derzeitig vorliegenden Informationen Wasser in den Reaktordruckbehälter (RDB) eingespeist wurde. Die Einspeisemenge war aber nicht ausreichend.

Anmerkung 12
Probleme mit den Füllstandsanzeigen bei sehr starken Transienten sind bekannt. Aus diesem Grunde wurden teilweise Kerninnentemperaturmessungen in der In-Core-Instrumentierung und störfallfeste Kernaustrittstemperaturmessungen nachgerüstet. Wesentlich ist die Frage, ob die Störfallinstrumentierung noch zur Verfügung stand und ob die notwendige Informationsgüte noch gewährleistet war.

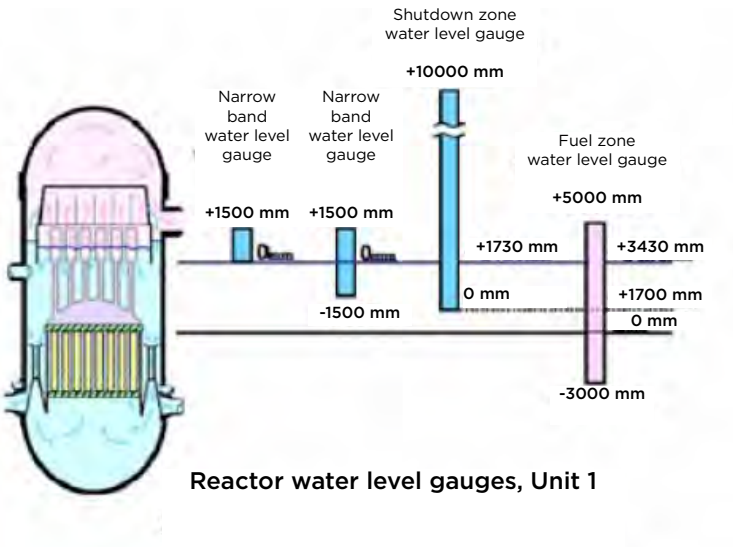
Am 14.03.2011 um 11:01 Uhr schloss aufgrund der Explosion in Block 3 das „grosse“ Ventil (AO205) zur Torus-Druckentlastung durch den Verlust der Ansteuerung (Druckluft). Ferner kam es durch die Explosion zum Verlust der vorbereiteten Wassereinspeiseleitung und zur Beschädigung eines dafür notwendigen Löschfahrzeuges (vgl. Quelle 43, Quelle 44). Der Drywell-Druck betrug zu dem Zeitpunkt 4.5 bar_{abs}

Am 14.03.2011 um 12:30 Uhr betrug der Wetwell-Druck (Torus) 4.86 bar_{abs}, die Temperatur im Torus betrug 149.3 °C (vgl. Quelle 44).

Am 14.03.2011 wurden zur Vermeidung von Wasserstoffexplosionen präventiv Öffnungen im Dach des Reaktorgebäudes geschaffen (vgl. Quelle 3).

Nach Verlust der Reaktorkühlung und -einspeisung um 13:25 Uhr wurde ein Erreichen des Füllstandes „Kernoberkante“ für 16:30 Uhr des 14.03.2011 abgeschätzt. Der Füllstand „Kernoberkante“ wurde tatsächlich um 17:17 Uhr erreicht (vgl. Quelle 44).

Am 14.03.2011 um 16:34 Uhr wurde, nach der Druckentlastung des RDB, mit der Vorbereitung zur Einspeisung von Meerwasser in den RDB begonnen (vgl. Quelle 1).



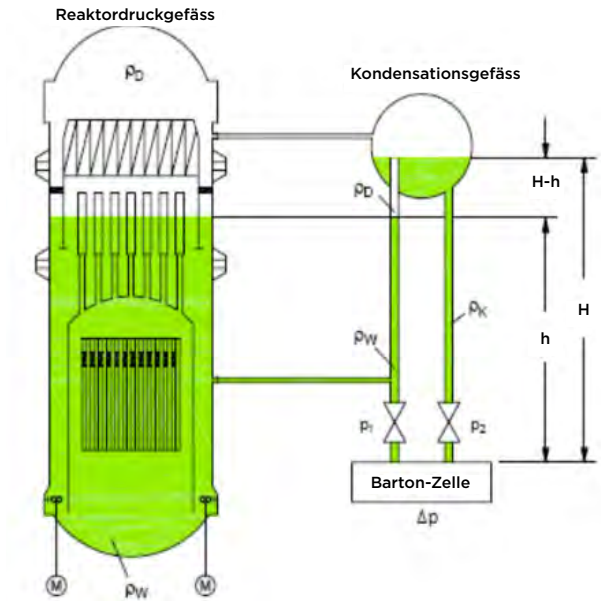


Abb. 11:
Füllstandsanzeige BWR Bsp. Block 1
Quelle: TEPCO

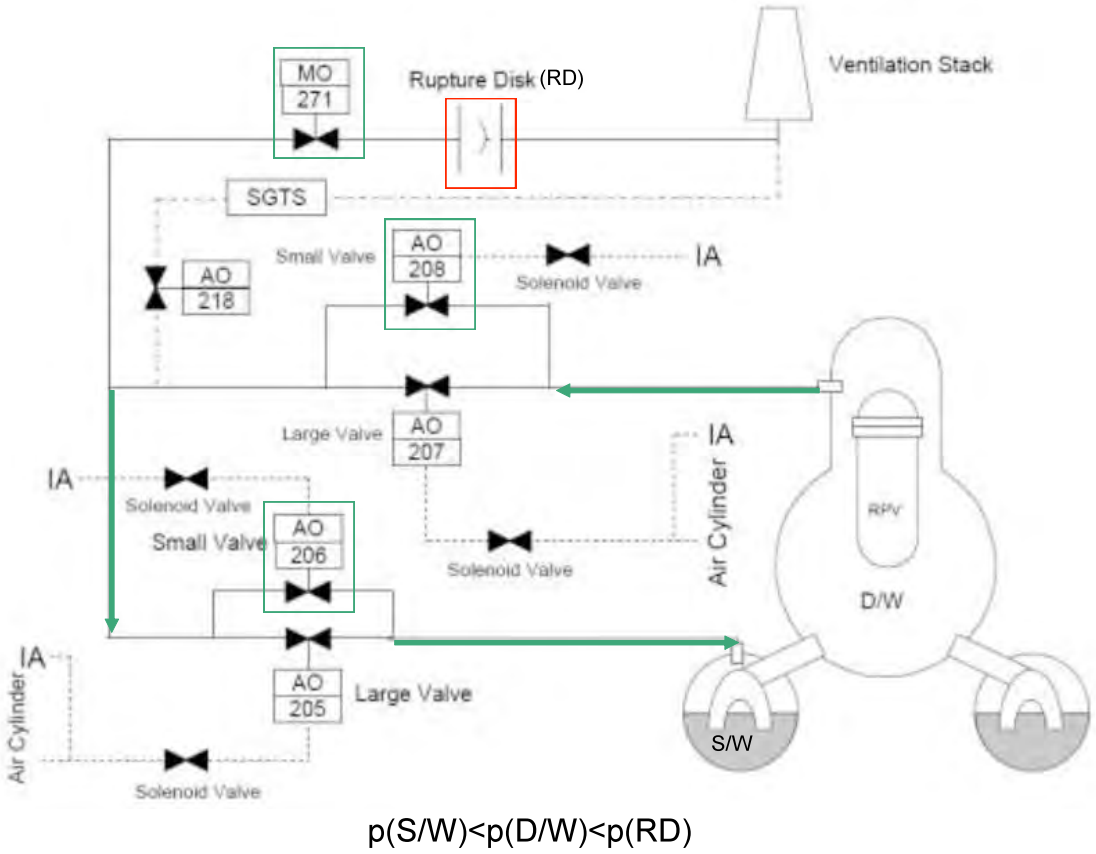


Abb. 12:
Ventingsystem Blöcke 2&3
Quelle 43

Durch die Druckentlastung des RDB gegen 18:03 Uhr (60.7 bar) wurde der RDB-Druck bis ca. 19:03 Uhr auf 6.3 bar abgesenkt (vgl. Quelle 44), der Reaktorfüllstand sank auf -3700 mm unter Kernoberkante (18:22 Uhr - vgl. Quelle 43). Es kam ferner zu einem signifikanten Druckanstieg im Primärcontainment (Drywell).

Am 14.03.2011 zwischen 19:20 Uhr und 19:54 Uhr wurde die Meerwassereinspeisung in den RDB aufgrund fehlenden Kraftstoffs (Diesel) des Löschfahrzeuges unterbrochen (vgl. Quelle 44). Es fand zwischen 13:25 Uhr und 19:54 Uhr für ca. 6 h keine Kühlmittelnachspeisung in den RDB statt. Laut Abschätzung der IAEA erreichte der RDB-Füllstand die Kernunterkante (Bottom of Active Fuel – BAF) ca. 76 h nach dem Tsunami (vgl. Quelle 46).

Am 14.03.2011 um 21:00 Uhr wurde das „kleine“ Ventil (AO206) zur Torus-Druckentlastung geöffnet (vgl. Quelle 44). Zwischen 21:20 Uhr und 22:50 Uhr wurde nochmals eine Druckentlastung des RDB mittels SRV durchgeführt. Der Drywell-Druck um 22:50 Uhr war kleiner als der Ansprechdruck der Berstscheibe (4.27 bar - Überdruck). Der Wetwell-Druck war zu diesem Zeitpunkt stabil im Bereich von 3-4 bar_{abs} (vgl. Quelle 44).

Am 15.03.2011 um 00:02 Uhr wurde das „kleine“ Ventil (AO208) zum Drywell für einige Minuten geöffnet. Es wird laut Quelle 44 bestätigt, dass die Berstscheibe nicht geöffnet hat. Der Drywell-Druck blieb bei 7.5 bar_{abs} stehen (vgl. Quelle 44). Ein weiterer Versuch zur Druckentlastung gegen 03:00 Uhr blieb erfolglos.

Am 15.03.2011 um 06:14 Uhr ereignete sich eine Wasserstoffexplosion innerhalb des Reaktorgebäudes. Aufgrund des danach abfallenden Drucks im Torus wird von einer Explosion im Bereich des Torus ausgegangen (vgl. Quelle 3).

Als Ursache der Explosion wird die unzureichende Nachspeisung mit daraus resultierender Hüllrohroxidation im Reaktorkern angesehen. Der freigesetzte Wasserstoff wurde über die RDB-Druckentlastung in den Torus abgegeben. Ob der Torus durch raue Kondensation (Einblasen von Heissdampf in bereits siedendes Wasser) vorgeschädigt wurde und dadurch ein zündfähiges Luft/Wasserstoffgemisch entstand oder ob der Torus durch die Explosion beschädigt wurde, ist derzeit nicht belegt. Es ist anzunehmen, dass aufgrund des höheren Drywell-Druckes und Nichtöffnen der Berstscheibe oder nicht geöffneter Armatur (MO271) vor der Berstscheibe zusätzlicher Wasserstoff in den Torus gedrückt wurde (siehe Abbildung 12). Wenn die Armatur MO271 geschlossen geblieben war, könnte auch ein Überdruckversagen der Rohrleitung mit anschliessender Zündung des Wasserstoffs die Ursache für die Explosion gewesen sein.

Am 15.03.2011 um 11:25 Uhr betrug der Drywell-Druck 1.55 bar_{abs} (vgl. Quelle 44).

Am 20.03.2011 um 15:46 Uhr konnte die externe Stromversorgung wieder hergestellt werden (siehe Quelle 35).
Am 20.04.2011 wurden bei einer Befahrung der Anlage mit Robotern hohe Werte für Temperatur und Luftfeuchte innerhalb des Reaktorgebäudes festgestellt (vgl. Quelle 29). Dies könnte von der Beschädigung des Torus herrühren (siehe Quelle 3).

Anmerkung 13
Die nicht ausreichende Kühlmittelergänzung lässt auf nicht ausreichende Einspeisemengen schliessen. Ob die notwendigen Wassereinspeisungen in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und wie diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war.

Anmerkung 14
Die grosse Verzögerung beim Venting ist nicht eindeutig erklärbar. Wenn es an den langen Entscheidungswegen gelegen hat, ist zu prüfen, wie Entscheidungen in Extremsituationen getroffen werden. Ab wann dürfen die Mitarbeiter auf der Anlage selbst entscheiden? Wofür sind Freigaben durch andere Entscheidungsträger notwendig? Wie wird dabei gewährleistet, dass die Entscheide rechtzeitig gefällt werden?

1.3.2 Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)

Als Folge des SBO kam es im Block 2 zum Ausfall der Brennelementlagerbeckenkühlung. Aufgrund der anhaltenden Nachzerfallsleistung führte dies zu einem Anstieg der Wassertemperatur und zu einem Absinken des Füllstands im Lagerbecken. Der letzte Brennelementwechsel für den Block 2 fand ab 18.11.2010 im Rahmen der Revisionsabstellung 2010 statt.

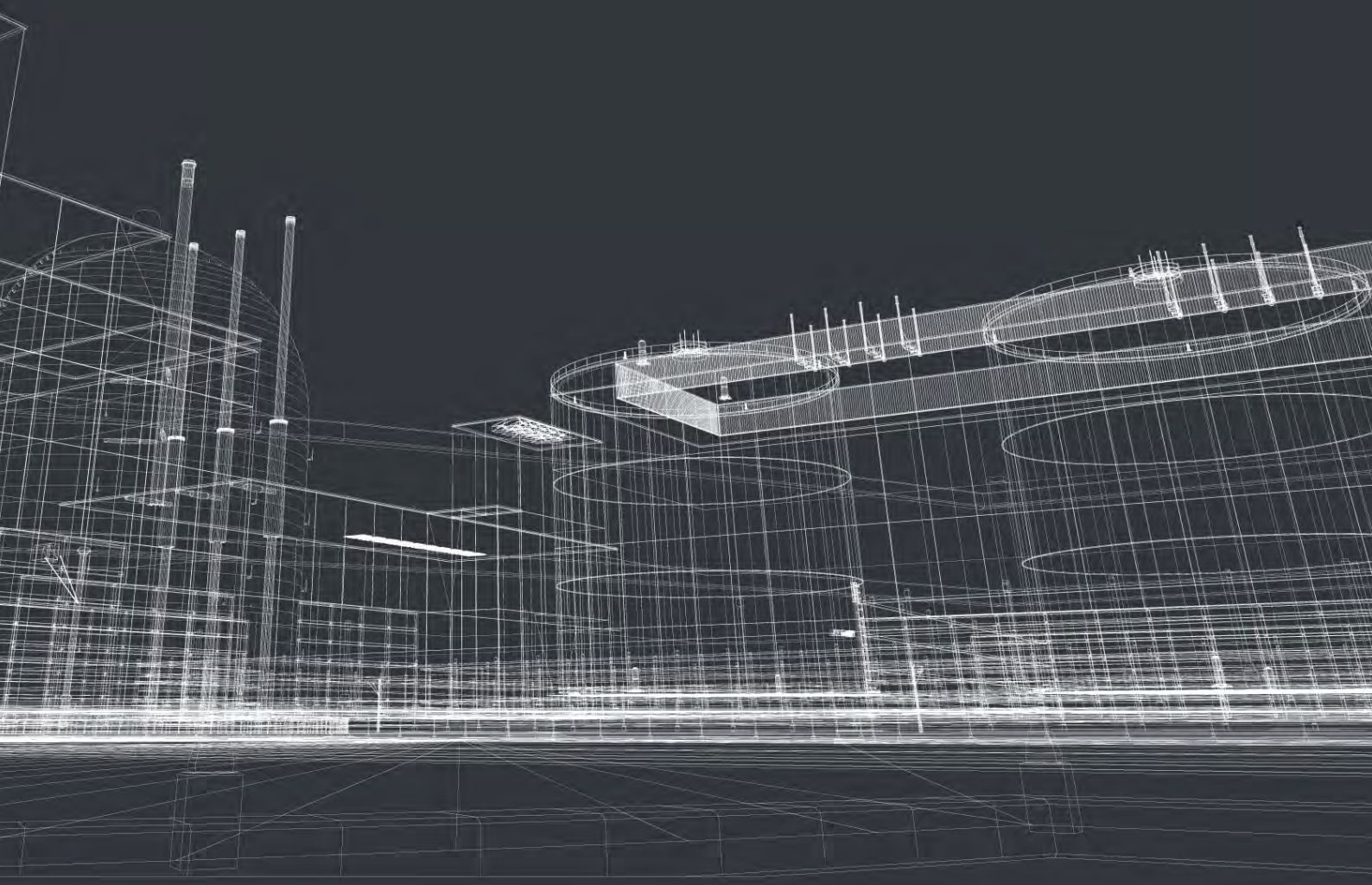
Am 20.03.2011 ab 15:05 Uhr wurde über die Kühlleitung des BE-Beckens erstmals Meerwasser in das BE-Becken nachgespeist. Ab dem 29.03.2011 erfolgte die Umstellung auf Frischwasser (Quelle 3).

Am 16.04.2011 wurden Wasserproben aus dem BE-Becken von Block 2 entnommen. In den Proben wurden die Nuklide I-131, Cs-134 und Cs-137 nachgewiesen (vgl. Quelle 30). Ob das Vorhandensein der Nuklide auf Schäden an den dort gelagerten BE zurückzuführen ist, ist derzeit nicht bekannt. Auch zum Zustand des BE-Beckens liegen keine gesicherten Informationen vor.

Anmerkung 15
Ob und wie notwendige Wassernachspeisungen für das Brennelementbecken in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und ob diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war. Weiter ist auch nicht bekannt, ob die notwendigen Anzeigen (Beckentemperatur, Beckenfüllstand) noch zur Verfügung standen.

Fukushima

37° 25‘ 26.57“ N, 141° 1‘ 56.87“ E
11.03.2011



1.4 Block 3

1.4.1 Reaktor

Nach der Reaktorschnellabschaltung um 14:47 Uhr wurde die Hauptturbine manuell ausser Betrieb genommen (vgl. Quelle 44). Nach dem durch den Verlust der externen Stromversorgung (Loss of Off-Site Power LOOP) ausgelösten Notstromfall erfolgte im Block 3 die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das manuell in Betrieb genommene Reactor Core Isolation Cooling System (RCIC) und danach über das High Pressure Coolant Injection System (HPCI). Aufgrund des Signals ‚Reaktorfüllstand hoch' wurde das RCIC mehrfach automatisch abgeschaltet.

Am 11.03.2011 um 15:35 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke. Ferner kam es durch den Ausfall der Notstromdiesel durch Überflutung zum Ausfall der notwendigen Stränge zur Nachwärmeabgabe an die ultimative Wärmesenke (Meerwasserkühlung) und zum SBO um 15:38 Uhr (vgl. Quelle 43). Damit war nur noch der Torus zur Aufnahme der Nachwärme vorhanden.

Am 11.03.2011 um 16:03 Uhr wurde das RCIC manuell in Betrieb genommen. Am 11.03.2011 um 21:58 Uhr war temporär die Beleuchtung im Hauptkontrollraum wieder hergestellt. Am 12.03.2011 um 11:36 Uhr schaltete das RCIC automatisch ab, das HPCI startete um 12:35 Uhr automatisch aufgrund niedrigem RDB-Füllstand (vgl. Quelle 44).

Am 12.03.2011 zwischen 12:30 Uhr und 19:00 Uhr nimmt der Reaktordruck um mehr als 60 bar ab und bleibt bei ca. 10 bar stabil stehen (vgl. Quelle 43). Es wird aufgrund des starken Druckabfalls vermutet, dass es zu einer Frischdampfleckage am HPCI-System gekommen ist (vgl. Quelle 43).

Aufgrund der Nachwärmeabfuhr in den Torus begann, nach dem Verlust der Druckabbaufunktion des Torus aufgrund zu hoher Temperatur, der Druckaufbau im Primärcontainment. TEPCO bereitete die Druckentlastung des Primärcontainments vor (vgl. Quelle 4).

Am 12.03.2011 um 17:30 Uhr weist der Kraftwerksleiter an, mit den Vorbereitungen zur Druckentlastung zu beginnen (vgl. Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 02:42 Uhr stoppt das HPCI. Um 05:10 Uhr gibt TEPCO bekannt, dass sämtliche Einspeisefunktionen nicht mehr verfügbar sind (vgl. Quelle 8). Zwischen 02:30 Uhr und 04:00 Uhr nimmt der RDB-Druck von ca. 10 bar auf ca. 70 bar zu. Die Vermutung einer Frischdampfleckage am HPCI-System wird durch den erneuten Druckanstieg im RDB bestätigt.

Der Druckabbau erfolgt ab diesem Zeitpunkt nur noch über die SRV. Zum Zeitpunkt des Stopps des HPCI waren keine Füllstandssignale verfügbar. Um 03:51 Uhr wurde die Gleichstromversorgung für die Instrumentierung wieder hergestellt, der Füllstand zeigte -1600 mm unter Kernoberkante (Top of active fuel – TAF) (vgl. Quelle 43).

Nach Abschätzungen von TEPCO erreicht der RDB-Füllstand die Kernoberkante um 04:15 Uhr am 13.03.2011 (vgl. Quelle 44). Laut Quelle 45 sinkt der RDB-Füllstand gegen 08:00 Uhr unter die Kernoberkante.

Am 13.03.2011 um 05:15 Uhr weist der Kraftwerksleiter an, mit den Vorbereitungen zur Druckentlastung bis zur Berstscheibe zu beginnen (vgl. Quelle 44). Um 05:23 Uhr sollte das „grosse" Ventil AO205 zur Druckentlastung des Torus geöffnet werden, die zum Öffnen notwendige Hilfsenergie (Druckluft) war jedoch nicht verfügbar. Nach dem Umschalten

des Drucklufttanks konnte das Ventil geöffnet werden (vgl. Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 07:39 Uhr wurde mit Containmentsprühen begonnen (vgl. Quelle 44).

Um 08:35 Uhr wurde das Hauptventil MO271 vor der Berstscheibe gemäss Prozedur 15 % geöffnet (vgl. Quelle 44). Am 13.03.2011 um 08:41 Uhr waren die Vorbereitungen der Druckentlastung des Primärcontainments (Drywell) abgeschlossen (vgl. Quelle 36, Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 09:20 Uhr wurde, nach der Durchführung einer manuellen RDB-Druckentlastung (09:08 Uhr), mit der Einspeisung von boriertem Frischwasser (bis ca. 12:20 Uhr) und danach mit Meerwasser über die Feuerlöschleitung (13:12 Uhr) begonnen (vgl. Quelle 3, Quelle 44). Es fand zwischen 02:42 Uhr und 09:20 Uhr für ca. 7 h keine Kühlmittelnachspeisung in den RDB statt (vgl. Quelle 46).

Am 13.03.2011 um 09:24 Uhr hat sich der Drywelldruck von 6.37 (09:10 Uhr) auf 5.4 bar_{abs} reduziert. TEPCO geht von einem erfolgreichen Venting aus (Berstscheibe geöffnet). Als Folge von Druckluftleckagen schliesst das Ventil AO205, nach Umschaltung des Drucklufttanks konnte das Ventil um 12:30 Uhr wieder geöffnet werden. Aufgrund des kontinuierlichen Abblasens der SRV und der daraus resultierenden hohen Raumtemperaturen und starken Vibrationen im Bereich des Torus konnte das Ventil nicht manuell blockiert werden (vgl. Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 15:28 Uhr wurde im Kontrollraum eine Dosisleistung von 12 mSv/h gemessen, die Operateure wurden nach Block 4 evakuiert (vgl. Quelle 44).

Am 13.03.2011 um 17:52 Uhr wurde ein mobiler Kompressor an die Druckluftversorgung angeschlossen. Der Kompressor wurde mit Hilfe eines Kranwagens über die Materialschleuse in das Reaktorgebäude eingeschleust. Aufgrund des sinkenden Drywelldrucks (20:10 Uhr) geht TEPCO davon aus, dass mittels des Kompressors das „grosse“ Torus-Ventingventil (AO205) geöffnet werden konnte.

Nach dem erneuten Verlust der Druckluftversorgung schloss das Ventil, der Druck im Drywell stieg von 2.65 bar (14.03.2011, 02:00 Uhr) auf 3.15 bar (03:00 Uhr) an (vgl. Quelle 44).

Am 14.03.2011 zwischen 01:10 Uhr und 03:20 Uhr (vgl. Quelle 3) musste die Nachspeisung mit Meerwasser aufgrund niedrigen Wasserstands im Zwischenspeicher unterbrochen werden.

Trotz fortgesetzter Nachspeisung kam es zum Absinken des RDB-Füllstands und zu einem Druckanstieg im RDB. Aufgrund hoher Dosisleistung im Drywell (ca. 140 Sv/h) wurde die Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens durch Abdeckung der BE mit ca. 30 % angegeben (vgl. Quelle 43).

Anmerkung 16
Die nicht ausreichende Kühlmittelergänzung lässt auf nicht ausreichende Einspeisemengen schliessen. Ob die notwendigen Wassereinspeisungen in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und wie diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war.

Anmerkung 17
Die Frage, ob die Störfallinstrumentierung noch zur Verfügung stand und die notwendige Informationsgüte noch gewährleistet war, ist nicht abschliessend geklärt.

Am 14.03.2011 um 05:20 Uhr wurde mit der Vorbereitung einer weiteren Druckentlastung des Primärcontainments begonnen (vgl. Quelle 36).

Am 14.03.2011 um 06:10 Uhr wurde das „kleine“ Ventil zur Torus-Druckentlastung (AO206) geöffnet. Nach dem erneuten Verlust der Druckluftversorgung schloss das Ventil; mehrere Versuche, das Ventil zu öffnen, blieben erfolglos (vgl. Quelle 44). Der Druck im Drywell betrug um 06:10 Uhr 4.6 $bar_{abs,}$ um 06:50 Uhr 5.3 $bar_{abs,}$ (vgl. Quelle 12) sowie um 09:05 Uhr 4.9 $bar_{abs,}$ (vgl. Quelle 43).

Der RDB wurde periodisch über die SRV druckentlastet, was zu einer Abdeckung der BE sowie zu einer Hüllrohroxidation der BE mit Freisetzung von Wasserstoff führte.

Es wird auch in diesem Fall vermutet, dass der Wasserstoff über Leckagen des Drywells (z. B. Deckeldichtung, Durchführungen, etc.), wiederum begünstigt durch hohen Drywell-Druck, im Reaktorgebäude akkumuliert wurde.

Am 14.03.2011 um 11:01 Uhr (vgl. Quelle 3) erfolgte eine Wasserstoffexplosion im Reaktorgebäude, welche zu starken Beschädigungen des Gebäudes von Block 3, von Ausrüstungen im Block 3 (Reaktorgebäudekran) und auch der Aussenhülle von Block 4 führte. Wie es zur Zündung des sich im Reaktorgebäude angesammelten Wasserstoffs kam, ist derzeit unklar.

Durch die Explosion wurden 11 Personen verletzt (4 TEPCO-Angestellte, 3 externe Arbeiter, 4 Armeeangehörige). Es kam durch die Druckwelle bzw. durch Trümmerflug zu Beschädigungen von Löschfahrzeugen sowie von Leitungen und Schläuchen, die Meerwasserein- bzw. -nachspeisung wurde dadurch unterbrochen. Trümmer mit sehr hohen Dosisleistungen erschweren seither die Arbeiten zusätzlich. Ferner beeinträchtigte die Explosion die Arbeiten am Block 2 (z. B. Druckluftversorgung, Venting – siehe Kapitel 1.3.1) (vgl. Quelle 44).

Am 14.03.2011 um 11:25 Uhr betrug der Reaktordruck laut Quelle 43 1.85 bar, der Drywell-Druck betrug 3.6 bar, der Druck im Torus betrug 3.8 bar.

1.4.2 Brennelementbecken (Spent Fuel Pool)

Aufgrund des SBO kam es im Block 3 ebenfalls zum Ausfall der BE-Beckenkühlung. Der letzte Brennelementwechsel für den Block 3 fand ab 23.09.2010 im Rahmen der Revision 2010 statt. Die anhaltende Nachzerfallsleistung führte zu einem Anstieg der Wassertemperatur und zu einem Absinken des Füllstands. Am 16.03.2011 um 09:48 Uhr wurde erstmals über Abwurf von einem Hubschrauber - später mit Wasserwerfern - Meerwasser in das BE-Becken nachgespeist (vgl. Quelle 3).

Aufgrund der starken Beschädigung des Reaktorgebäudes und der daraus resultierenden Trümmerbedeckung im BE-Becken (Abbildung 13 - vgl. Quelle 18) muss von einer mechanischen Beschädigung der im BE-Becken gelagerten BE ausgegangen werden. Die Anstiege in der Ortsdosisleistung (bis ca. 11 mSv/h) am Haupt- bzw. Westtor nach Dampfaustritten aus dem BE-Becken am 16.03.2011 und 21.03.2011 (vgl. Quelle 19) deuten ebenfalls auf Beschädigungen der BE hin. Nuklidspezifische Analysen vom 08./09.05.2011 belegen eine starke Konzentration von Radionukliden (hauptsächlich Cs-134/137) im Becken im Vergleich zum Referenzwert vom 02.03.2011 (vgl. Quelle 37). Dies deutet ebenfalls auf eine Beschädigung der BE hin.

Anmerkung 18
Ob und wie notwendige Wassernachspeisungen in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und ob diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden, erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war. Weiter ist nicht bekannt, ob die notwendigen Anzeigen (Beckentemperatur, Beckenfüllstand) noch zur Verfügung standen.

Abb. 13:
Trümmerbedeckung BE-Becken Block 3
Quelle: 18

1.5 Block 4

Der Block 4 befand sich zum Zeitpunkt des Erdbebens und dem anschliessenden SBO aufgrund eines anstehenden Kernmantelaustausches seit dem 29.11.2010 in Revision. Der Reaktordruckbehälter war für den bevorstehenden Kernmanteltausch komplett entladen. Die gesamte Kernbeladung befand sich aus diesem Grund im BE-Lagerbecken. Die Dekontamination des Primärkreises war zum Ereigniszeitpunkt abgeschlossen.

Von den vorhandenen Notstromdieseln befand sich ein Aggregat im Revisionsstillstand, ein zweites startete nach dem Erdbeben automatisch (vgl. Quelle 43). Alle Arbeiten und Inspektionen am Block 4 wurden nach dem Erdbeben gestoppt (vgl. Quelle 43).

Am 11.03.2011 um 15:35 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke. Ferner kam es durch den Ausfall der Notstromdiesel (Überflutung) zum Ausfall der notwendigen Stränge zur Nachwärmeabgabe an die ultimative Wärmesenke (Meerwasserkühlung) und zum SBO um 15:38 Uhr (vgl. Quelle 43). Infolge des SBO fiel die Kühlung des Brennelementlagerbeckens aus. Die Nachzerfallsleistung der 1535 Brennelemente (maximale BE-Becken Kapazität: 1590 Elemente – siehe Quelle 43) führte zu einem Anstieg der Wassertemperatur und zu einem langsamen Abnehmen des Füllstands.

Am 14.03.2011 um 04:08 Uhr wurde laut Quelle 3 eine Wassertemperatur von 84 °C erreicht.

Am 15.03.2011 um 06:14 Uhr ereignete sich eine Explosion im Reaktorgebäude von Block 4, welche zur Beschädigung der Gebäudestruktur führte. Die Ursache der Explosion ist derzeit noch strittig. Dass es sich wie in den Blöcken 1 bis 3 um eine Wasserstoffexplosion durch Oxidation der Hüllrohre gehandelt hat, erscheint hinsichtlich des zeitlichen Ablaufes und angesichts des Wasservolumens im BE-Becken als nicht plausibel. Die Hypothese des Analyse-Teams, dass aufgrund des Erdbebens das BE-Becken beschädigt wurde und der Füllstand deswegen schneller sinkt, wurde laut Quelle 9 widerlegt, TEPCO bestätigt darin die BE-Becken-Integrität.

Abbildung 14:
Ansicht Blöcke 3 & 4 nach den Wasserstoffexplosionen
Quelle: TEPCO

Hypothesen, denen zufolge Wasserstoff aus anderen Quellen, z. B. Venting Block 3 (siehe Kapitel 1.4.1) und Verbindung der Lüftungskanäle der Blöcke 3 und 4 am Kaminfuss (vgl. Quelle 10) oder die Bildung eines explosiven Gemisches aufgrund von Schweiss-/Schneidgas (Zerlegung des Kernmantels) für die Explosion verantwortlich sein könnte, lassen sich derzeit nicht eindeutig belegen (siehe auch Quelle 43). Neuere Berichte gehen jedoch davon aus, dass Wasserstoff aus Block 3 über die gemeinsame Abluftleitung und das “Emergency Gas Treatment Facility“ von Block 4 in den oberen Teil des Reaktorgebäudes von Block 4 strömen konnte (siehe Abbil-

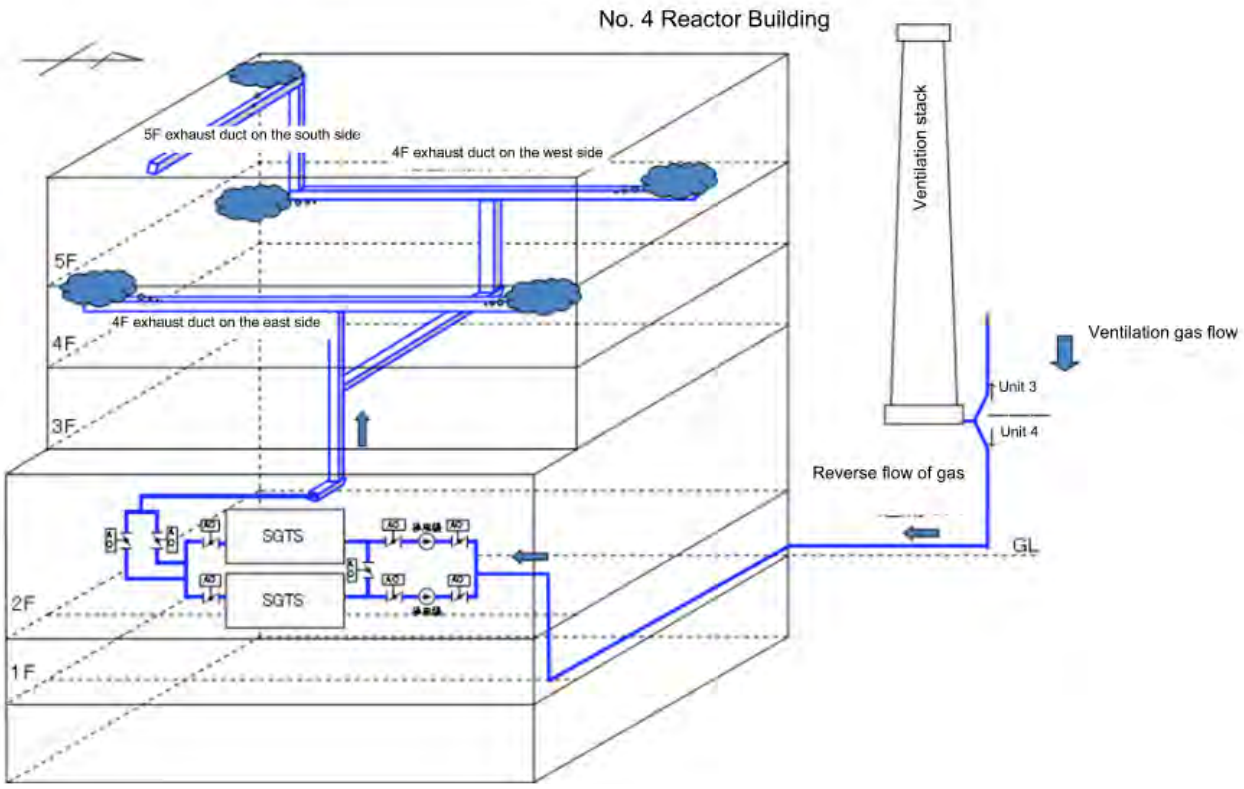


Abbildung 15:
H2 Überströmen von Block 3 nach Block 4
Siehe Abbildung IV-5-10
Quelle: 43

dung 15). Offenbar verfügt die "Emergency Gas Treatment Facility" nicht über Rückschlagklappen, um ein derartiges Überströmen zu verhindern (IV-90/IV-96 Quelle 43).

Als Ursache für die gemeldeten Brände im Reaktorgebäude am 15.03.2011 um 09:38 Uhr und 16.03.2011 vom 05:45 Uhr (vgl. Quelle 1) wird derzeit eine Ölleckage vermutet (vgl. Quelle 10).

Am 21.03.2011 von 06:37 Uhr bis 08:41 Uhr erfolgte, zur BE-Beckenkühlung und zur Kompensation der Verdunstung, erstmals die Einspeisung von Wasser mit mobilen Wasserwerfern (vgl. Quelle 3). Die Nachspeisung wurde später mit Feuerwehrpumpen bzw. mit einer Betonpumpe fortgesetzt.

Quelle 21 zeigt eine geringe Trümmerbedeckung im BE-Becken von Block 4 infolge der Wasserstoffexplosion (siehe Abbildung 16), mechanische Beschädigungen an den BE sind bisher nicht erkennbar. Nuklidspezifische Analysen vom 08./09.05.2011 belegen eine erhöhte Konzentration von Radionukliden (hauptsächlich Cs-134/137) im Becken im Vergleich zum Referenzwert vom 04.03.2011 (vgl. Quelle 38). Ob diese Nuklide von BE-Schäden im Block 4 herrühren oder auf einen Eintrag aus anderen Blöcken zurückzuführen sind, ist derzeit nicht klar.

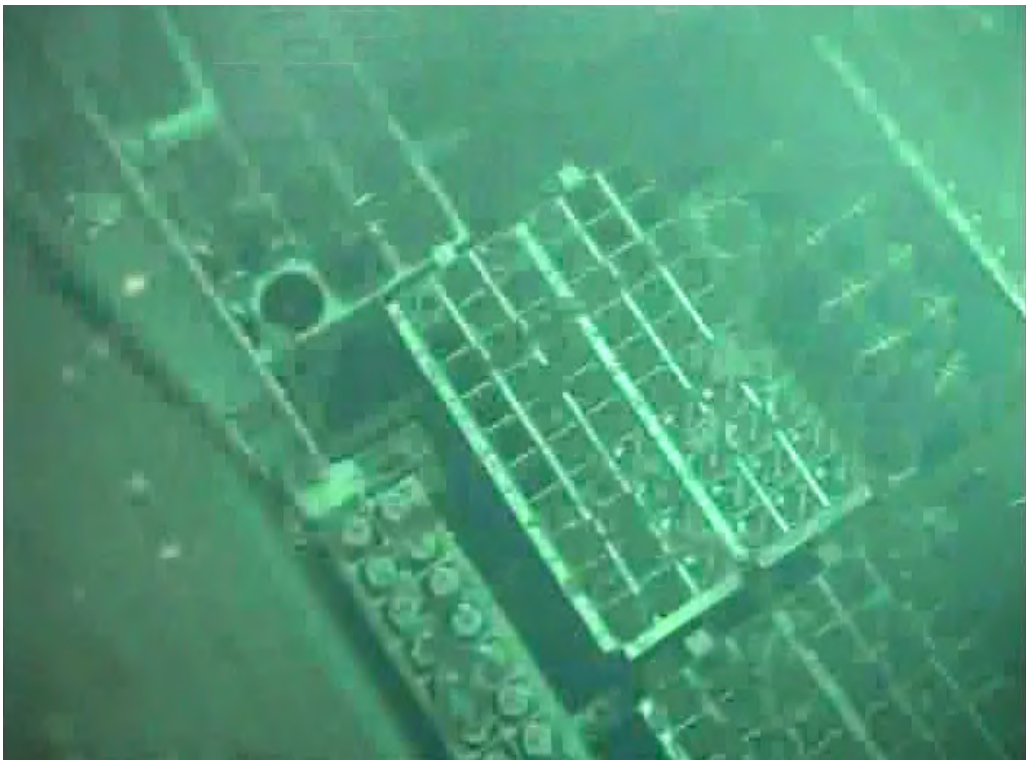


Abb. 16:
Lagerbecken Block 4 am 29.04.2011
Quelle: TEPCO

Aufgrund der relativ geringen Nuklidkonzentrationen im Beckenwasser und der durchgeführten visuellen Inspektionen wird laut Quelle 43 jedoch davon ausgegangen, dass die Elemente zum Grossteil unbeschädigt („nearly undamaged“) geblieben sind.

Anmerkung 19
Ob und wie notwendige Wassernachspeisungen in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und ob diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war. Weiter ist nicht bekannt, ob die notwendigen Anzeigen (Beckentemperatur, Beckenfüllstand) noch zur Verfügung standen.

1.6 Blöcke 5 & 6

Am 11.03.2011 um 15:35 Uhr kam es in Folge der zweiten Tsunamiwelle zur Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke. Ferner kam es durch den Ausfall der Notstromdiesel durch Überflutung zum Ausfall der notwendigen Stränge zur Nachwärmeabgabe an die ultimative Wärmesenke (Meerwasserkühlung) und um 15:38 Uhr zum SBO (vgl. Quelle 43). Die Blöcke 5 und 6 des Kernkraftwerks Fukushima Dai-ichi befanden sich zum Zeitpunkt des SBO in Revision, die Reaktordruckbehälter waren komplett beladen. Während sich Block 6 im Zustand ‚cold shutdown' befand, wurde am Block 5 die Dichtheitsprüfung am RDB durchgeführt (vgl. Quelle 43).

Der dritte, luftgekühlte Dieselgenerator (DG) im Block 6 wurde nicht durch den Tsunami überflutet. Da dieser DG durch den Ausfall der Kühlwasserversorgung nicht beeinträchtigt wurde, blieb er weiterhin funktionsfähig (vgl. Quelle 32).

Aufgrund der Dichtheitsprüfung (Druckprüfung) in Block 5 betrug der Reaktordruck beim SBO 72 bar, als Folge der Nachzerfallsleistung stieg der RDB-Druck kurzzeitig auf ca. 80 bar an. Am 12.03.2011 um 06:06 Uhr wurde eine Druckentlastung des RDB vorgenommen. In Block 6 war ebenfalls ein Druckanstieg im RDB zu verzeichnen. Der Druck stieg aufgrund der geringeren Nachzerfallsleitung, bedingt durch den längeren Anlagenstillstand, langsamer als in Block 5 an (vgl. Quelle 43).

Am 14.03.2011 um 05:00 Uhr war für Block 5 die Stromversorgung für die Einspeisung aus dem Kaltkondensatbehälter wieder hergestellt. Der Druckabbau erfolgte in beiden Blöcken über die SRV, die Nachspeisung über die Kaltkondensatbehälter (vgl Quelle 43). Infolge der diversen überflutungsbedingten Ausfälle von Ausrüstungen fielen die Kühleinrichtungen der Brennelementlagerbecken aus. Die Nachzerfallsleistung führte jeweils zu einem Anstieg der Wassertemperatur und zu einem langsamen Abnehmen des Füllstands (vgl. Quelle 1). Am 16.03.2011 wurde gegen 08:00 Uhr laut Quelle 1 die Wassertemperatur von 60 °C in beiden BE-Becken überschritten.

Am 19.03.2011 wurden, zur Vermeidung von Wasserstoffexplosionen im Reaktorgebäude, präventiv Öffnungen im Dachbereich der Reaktorgebäude geschaffen (vgl. Quelle 39).

Die Wassereinspeisung in den RDB und das BE-Lagerbecken erfolgte zunächst mit Hilfe des 3. Dieselgenerators vom Block 6 (luftgekühlter Diesel) über die Kaltkondensateinspeisungen (Kühlmittelergänzung) (vgl. Quelle 3). Am 19.03.2011 konnte der 2. Diesel des Blocks 6 nach einer Reparatur wieder gestartet werden. Die Stromversorgung zu den Nachwärmeabfuhrpumpen der Blöcke 5 und 6 konnte damit sichergestellt werden, und die BE-Becken wurden wieder gekühlt (vgl. Quelle 3).

Am 20.03.2011 um 14:30 Uhr erreichte der Block 5 den Zustand „cold shutdown" (vgl. Quelle 3).

Am 22.03.2011 um 19:41 Uhr waren alle Verbraucher an das externe Stromnetz angeschlossen (vgl. Quelle 36).

1.7 Brennelement-Nasslager (Common Spent Fuel Pool)

Infolge des Ausfalls des externen Stromnetzes kam es im so genannten „Common Spent Fuel Pool“ ebenfalls zum Ausfall der BE-Beckenkühlung. Die Nachzerfallsleistung von 6375 BE (Lagerkapazität 6840 Elemente - vgl. Quelle 43) führte zu einem langsamen Anstieg der Beckentemperatur (11.03.2011 ca. 30 °C - vgl. Quelle 43; 19.03.2011, 09:00 Uhr, 57 °C – vgl. Quelle 3) und zu einem Absinken des Füllstands durch Verdunstung. Die Einspeisung von Wasser mittels Löschfahrzeugen am 21.03.2011 von 10:37 Uhr bis 15:30 Uhr sowie die Wiederherstellung der BE-Beckenkühlung am 24.03.2011 um 18:05 Uhr (vgl. Quelle 3) führte zu einer kontinuierlichen Abnahme der BE-Beckentemperatur und zu einer Stabilisierung im Bereich < 30 °C.

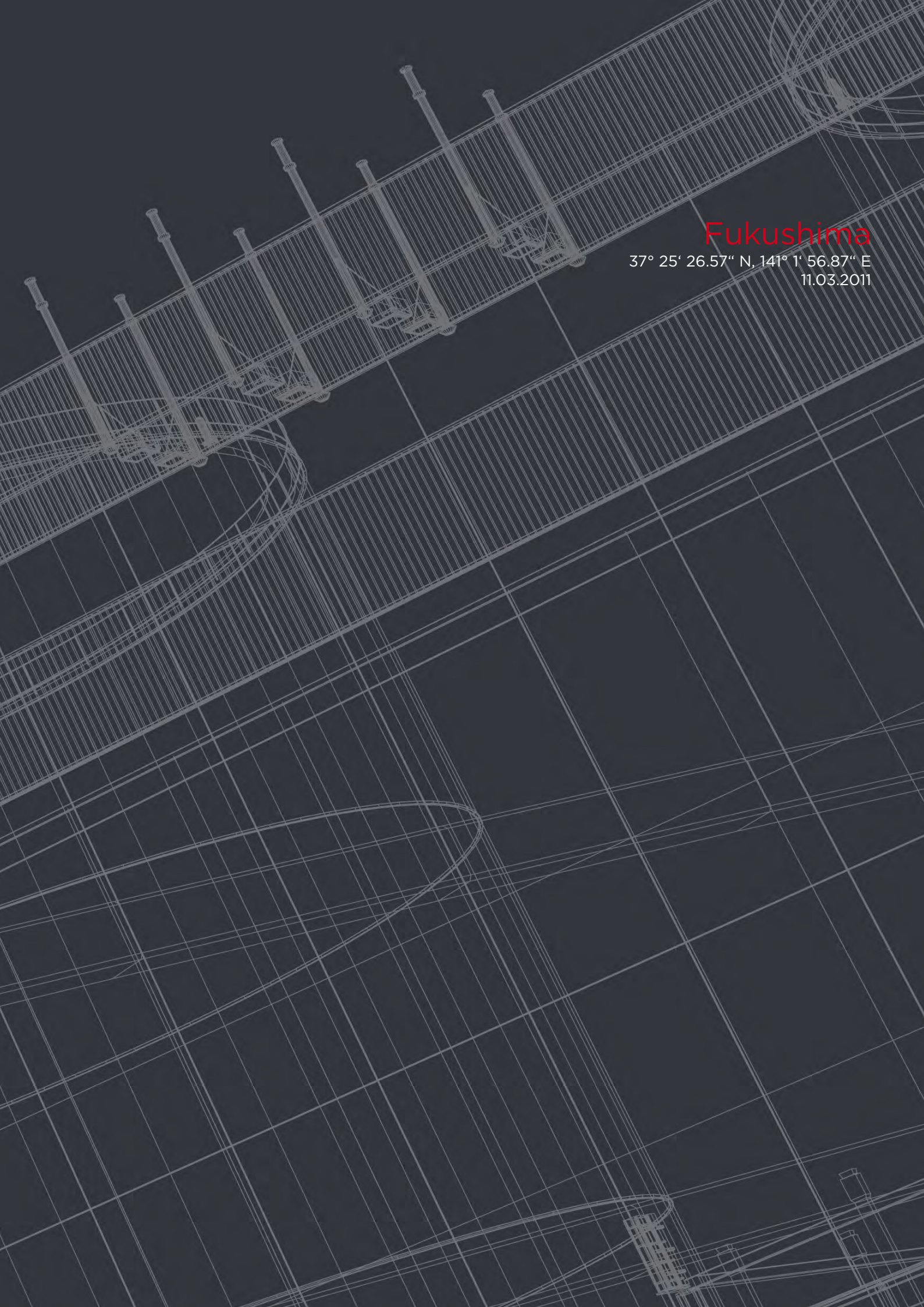
Am 13.05.2011 wurden Wasserproben zum Nachweis der BE-Integrität aus dem Common Spent Fuel Pool entnommen. Diese Proben zeigen gegenüber den Referenzwerten vom Februar 2011 eine Aktivitätszunahme von Cs-134 und Cs-137 (vgl. Quelle 22). Ob die Aktivitätswerte auf BE-Schäden zurückzuführen sind, wird derzeit geprüft.

1.8 Brennelement-Trockenlager (Dry Storage Cask Facility)

Bedingt durch den SBO kam es in der so genannten „Dry Storage Cask Facility“ zum Ausfall aller elektrischen Systeme. Das Behälter-Trockenlager verfügt jedoch über eine Naturzugkühlung (vgl. Quelle 11), wodurch die Kühlung der Behälter bzw. BE nicht beeinträchtigt war.

Am 17.03.2011 wurde durch den Betreiber eine Sichtprüfung durchgeführt. Diese ergab keine Abweichungen vom Normalzustand (vgl. Quelle 12).

Ob die in Quelle 12 beschriebene detaillierte Inspektion stattgefunden hat, ist derzeit nicht bekannt, wie auch die Ergebnisse der Inspektion des Lagers und der Behälter.



Fukushima

37° 25‘ 26.57“ N, 141° 1‘ 56.87“ E
11.03.2011

2 Ereignisablauf Fukushima Daini

2.1 Ereignisablauf allgemein

Vor Ereigniseintritt befanden sich die Blöcke des Kernkraftwerks Fukushima Daini:

Block 1
BWR/5, 3293 MW_{th} Mark II,
Hersteller: Toshiba (1975 – 1982)

Block 2
BWR/5 advanced, 3293 MW_{th} Mark II,
Hersteller: Hitachi (1979 – 1984)

Block 3
BWR/5 advanced, 3293 MW_{th} Mark II,
Hersteller: Toshiba (1980 – 1985)

Block 4
BWR/5 advanced, 3293 MW_{th} Mark II,
Hersteller: Hitachi (1980 – 1987)

im Leistungsbetrieb.

Der Betreiber dieser Anlagen ist ebenfalls TEPCO (Tokyo Electric Power Company).

Abb. 17:
Fukushima Daini, Überblick
Quelle: TEPCO

Aufgrund des Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Erdbebens vom 11.03.2011 um 14:46 Uhr (Magnitude M_W = 9.0) kam es zur automatischen Reaktorschnellabschaltung der Blöcke 1 bis 4 (vgl. Quelle 1).

Anders als in Fukushima Dai-ichi kam es nicht zu einem Ausfall der externen Stromversorgung infolge des Erdbebens (vgl. Quelle 14). Es liegt jedoch nahe, dass kurzfristige Spannungsunterbrüche bzw. Spannungsspitzen aufgetreten sind, da es Anregesignale für den Start der Notstromdiesel gab und es zum Containmentabschluss gekommen ist.

Durch die Tsunami-Einwirkung kam es am Standort Daini ebenfalls zu einer teilweisen Überflutung des Geländes und zur Beschädigung von Ausrüstungen (Nebenkühlwasseranlagen der Blöcke 1, 2 und 4). Gemäss TEPCO-Informationen vom 30.03.2011 sind die zwei Notstromdiesel von Block 1 durch die Überflutung irreparabel ausgefallen. Die Dieselgeneratoren des Blocks 2 konnten - trotz Überflutung - durch Instandsetzung und nach Wiederherstellung der Kühlwasserversorgung ab 14.03.2011 wieder in Betriebsbereitschaft gebracht werden. Zwei Dieselgeneratoren des Blocks 3 und ein Dieselgenerator des Blocks 4 blieben funktionsfähig. Die restlichen Dieselgeneratoren des Blocks 4 konnten nach Wiederherstellung der Kühlwasserversorgung ab 14.03.2011 wieder in Betriebsbereitschaft gebracht werden (vgl. Quelle 43).

Aufgrund der etwa um 2 m höheren Geländelage und etwas günstigeren Gebäudeausführungen waren die Schäden etwas geringer (siehe Abbildung 18).

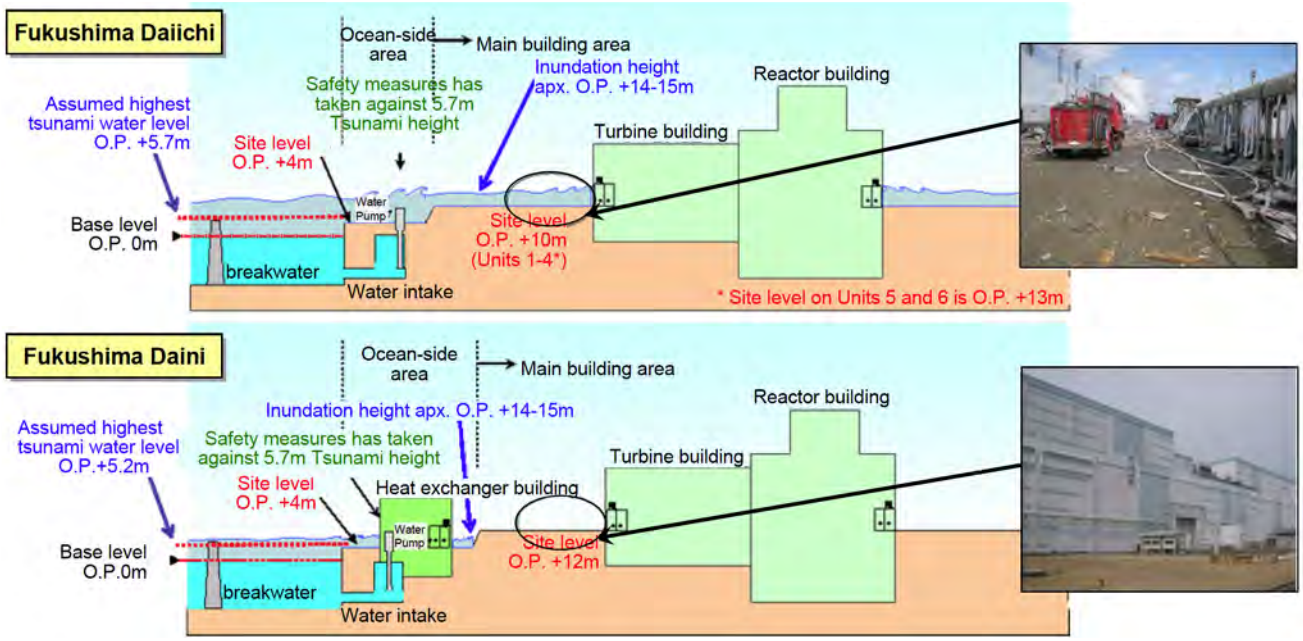


Abb. 18:
Überflutung Vergleich Dai-ichi & Daini
Quelle: TEPCO

Anmerkung 20
Ob es Notfallmassnahmen zur Kühlwasserversorgung der Diesel für den Fall des Verlustes der externen Stromversorgung gegeben hat und wie diese in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind und ob diese verifiziert wurden, ist derzeit nicht bekannt. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden, erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war. Vermutlich standen die notwendigen Anzeigen (Beckentemperatur, Beckenfüllstand) aufgrund der externen Stromversorgung noch zur Verfügung.

Anmerkung 21
Eine diversitäre Wasserversorgung (Brunnen, Staubecken, etc.) hätte sich positiv auf den Verlauf ausgewirkt.

Anmerkung 22
Eine gesicherte räumliche Trennung innerhalb der Kühlwasserpumpenhäuser hätte ggf. die nuklearen Nebenkühlwassersysteme besser schützen können.

Anmerkung 23
Die im Rahmen von OSART- und WANO-Missionen durchgeführten Reviews hätten auch Schwachstellen in der Anlage erkennen müssen. Ein direkter Bezug zur Auslegung ist im Rahmen der Reviews nicht gegeben. Allerdings kann indirekt, im Rahmen der „Operating Experience“ (OE) z. B. bei OSART-Missionen, durch die IRS-Reports (z. B. 7342 oder 7788) oder bei WANO-Missionen durch die Significant Operating Experience Reports (SOER) über wichtige Betriebserfahrungen der Mitgliedsunternehmen, die Auslegung und Nachrüstung der Anlage hinterfragt werden. Die WANO-Mitgliedsunternehmen haben sich verpflichtet, die Empfehlungen der WANO – SOER spezifisch zu prüfen und die daraus ggf. abgeleiteten Massnahmen bei Peer Reviews überprüfen zu lassen. Dies ist eine Eigenverpflichtung der Betreiber, und eine Transparenz nach aussen gibt es nicht. Bei OSART sieht es etwas anders aus, allerdings fehlt dort die Verpflichtung aller Länder über die IAEA, alle daraus abzuleitenden allfälligen Massnahmen im Hinblick auf die Sicherheit auch durchzusetzen. Im Rahmen der periodischen Sicherheitsüberprüfungen sollte der Anlagenstatus alle 10 Jahre überprüft werden. Auch dort gibt es international unterschiedliche Vorgehensweisen und Massstäbe. Diese drei Instrumente zusammen könnten im Rahmen eines verpflichtenden, kontinuierlichen Prozesses das Sicherheitsniveau von kerntechnischen Anlagen weltweit erhöhen.

2.2 Block 1

Nach der Reaktorschnellabschaltung erfolgte die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das RCIC-System. Die externe Stromversorgung blieb erhalten.

Am 11.03.2011 um ca. 15:38 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur teilweisen Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke.

Der Druckanstieg im Primärcontainment führte zum automatischen Start der Emergency Core Cooling Systems (ECCS). TEPCO vermutet zu dem Zeitpunkt eine Leckage von Kühlmittel in das Primärcontainment (vgl. Quelle 13). Nachdem das RCIC abschaltete (12.03.2011, 03:48 Uhr), wurde Kühlwasser aus dem Kaltkondensatbehälter nachgespeist.

Am 12.03.2011 um 05:22 Uhr war die Druckabbaufunktion aufgrund siedender Kondensationskammer nicht mehr verfügbar (vgl. Quelle 14). Die Vermutung einer Kühlmittelleckage ins Primärcontainment bestätigte sich nicht. Am 12.03.2011 um 07:10 Uhr wird mit dem Drywellsprühen begonnen (vgl. Quelle 43).

Am 12.03.2011 um 07:45 Uhr wird aufgrund der Meldung „Verlust der Druckabbaufunktion“ von der Regierung die Evakuierung der 3-km-Zone und der Aufenthalt im Haus im Umkreis von 10 km von Daini angeordnet. Am 12.03.2011 um 17:39 Uhr wird die Evakuierung des 10-km-Umkreises um Daini verfügt (vgl. Quelle 3).

Am 12.03.2011 um 08:19 Uhr gab es eine Alarmmeldung, dass ein Steuerstab nicht vollständig eingefahren war. Diese wurde um 10:43 Uhr aufgehoben, alle Stäbe sind ordnungsgemäss eingefahren (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 zwischen 09:43 Uhr und 18:00 Uhr bereitete TEPCO die Druckentlastung des Primärcontainments vor (vgl. Quelle 14).

Am 14.03.2011 um 01:24 Uhr wurde, nach der Wiederherstellung der Not- und Nachkühlsysteme durch Ersatz der Motoren der Nebenkühlwasserpumpen, die Reaktorkühlung wieder aufgenommen. Die zugehörigen Schaltanlagen waren irreparabel beschädigt, somit musste die Stromversorgung über temporäre Kabel hergestellt werden (vgl. Quelle 43).

Am 14:03.2011 um 10:15 Uhr sinkt die Temperatur im Torus unter 100 °C (vgl. Quelle 43).

Aufgrund der Wiederherstellung der Nebenkühlwasserversorgung musste eine Druckentlastung des Primärcontainments nicht mehr durchgeführt werden (vgl. Quelle 17).

Am 14.03.2011 um 17:00 Uhr erreichte der Reaktor den Zustand „cold shutdown“ (vgl. Quelle 15).

Am 15.03.2011 zwischen 15:20 Uhr und 16:25 Uhr kam es aufgrund eines Fehlers in der Stromversorgung der Nebenkühlwasserpumpe zur Unterbrechung der Not- und Nachkühlung (vgl. Quelle 16).

Anmerkung 24
Weil es nicht zum Netzausfall kam und weil die nukleare Nebenkühlwasservorsorgung wiederhergestellt werden konnte, kam es nicht zu einer Aktivitätsfreisetzung. Auch hier sind die Notfallmassnahmen zur Kühlwasserversorgung und wie diese in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind, zu hinterfragen. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war.

2.3 Block 2

Nach der Reaktorschnellabschaltung erfolgte die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das RCIC-System. Die externe Stromversorgung blieb erhalten.

Am 11.03.2011 um ca. 15:38 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur teilweisen Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke.

Am 12.03.2011 um 04:50 Uhr hat das RCIC abgeschaltet, und es wurde aus dem Kaltkondensatbehälter Kühlwasser in den RDB nachgespeist (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 um 05:32 Uhr war die Druckabbaufunktion aufgrund siedender Kondensationskammer nicht mehr verfügbar (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 zwischen 10:33 Uhr und 22:58 Uhr bereitete TEPCO die Druckentlastung des Primärcontainments vor (vgl. Quelle 14).

Am 14.03.2011 um 07:13 Uhr wurde, nach der Wiederherstellung der Not- und Nachkühlsysteme durch Ersatz der Motoren der Nebenkühlwasserpumpen, die Reaktorkühlung wieder aufgenommen. Die zugehörigen Schaltanlagen waren irreparabel beschädigt, somit musste die Stromversorgung über temporäre Kabel hergestellt werden (vgl. Quelle 43).

Am 14.03.2011 um 15:52 Uhr sinkt die Temperatur im Torus unter 100 °C (vgl. Quelle 43).

Aufgrund der Wiederherstellung der Nebenkühlwasserversorgung musste eine Druckentlastung des Primärcontainments nicht mehr durchgeführt werden (vgl. Quelle 17).

Am 14.03.2011 um 18:00 Uhr erreichte der Reaktor den Zustand „cold shutdown“ (vgl. Quelle 15).

Anmerkung 25
Weil es nicht zum Netzausfall kam und weil die nukleare Nebenkühlwasservorsorgung wiederhergestellt werden konnte, kam es nicht zu einer Aktivitätsfreisetzung. Auch hier sind die Notfallmassnahmen zur Kühlwasserversorgung und wie diese in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind, zu hinterfragen. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war.

2.4 Block 3

Nach der Reaktorschnellabschaltung erfolgte die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das RCIC-System, und die Nachspeisung erfolgte aus dem Kaltkondensatbehälter.

Die Tsunamiwelle von 15:38 Uhr führte nicht zum Verlust der ultimativen Wärmesenke, und Strang B des "Residual Heat Removal Systems" (RHR) blieb funktionsfähig (vgl. Quelle 43)..

Am 12.03.2011 zwischen 12:08 Uhr und 12:13 Uhr bereitete TEPCO präventiv die Druckentlastung des Primärcontainments vor, die jedoch nicht erforderlich war (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 um 12:15 Uhr erreichte der Reaktor den Zustand „cold shutdown" (vgl. Quelle 14).

2.5 Block 4

Nach der Reaktorschnellabschaltung erfolgte die Nachwärmeabfuhr auslegungsgemäss über das RCIC-System. Die externe Stromversorgung blieb erhalten.

Am 11.03.2011 um ca. 15:38 Uhr kam es in Folge des Tsunamis zur teilweisen Zerstörung des Kühlwassereinlaufs und damit zum Verlust der ultimativen Wärmesenke.

Am 12.03.2011 (eine genaue Uhrzeit ist hier nicht bekannt) hat das RCIC abgeschaltet, und es wurde aus dem Kaltkondensatbehälter Wasser in den RDB nachgespeist (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 um 06:07 Uhr war die Druckabbaufunktion aufgrund siedender Kondensationskammer nicht mehr verfügbar (vgl. Quelle 14). Am 12.03.2011 um 07:35 Uhr wird mit dem Drywellsprühen begonnen (vgl. Quelle 43).

Am 12.03.2011 zwischen 11:44 Uhr und 11:52 Uhr bereitete TEPCO die Druckentlastung des Primärcontainments vor (vgl. Quelle 14).

Am 12.03.2011 um 12:43 Uhr gab es eine Alarmmeldung, dass ein Steuerstab nicht vollständig eingefahren war. Diese Meldung wurde jedoch nicht bestätigt, die Abschaltung war korrekt erfolgt (vgl. Quelle 23).

Am 14.03.2011 um 15:42 Uhr wurde, nach der Wiederherstellung der Not- und Nachkühlsysteme durch Ersatz der Motoren der Nebenkühlwasserpumpen, die Reaktorkühlung wieder aufgenommen. Die zugehörigen Schaltanlagen waren irreparabel beschädigt, somit musste die Stromversorgung über temporär verlegte Kabel hergestellt werden (vgl. Quelle 43).

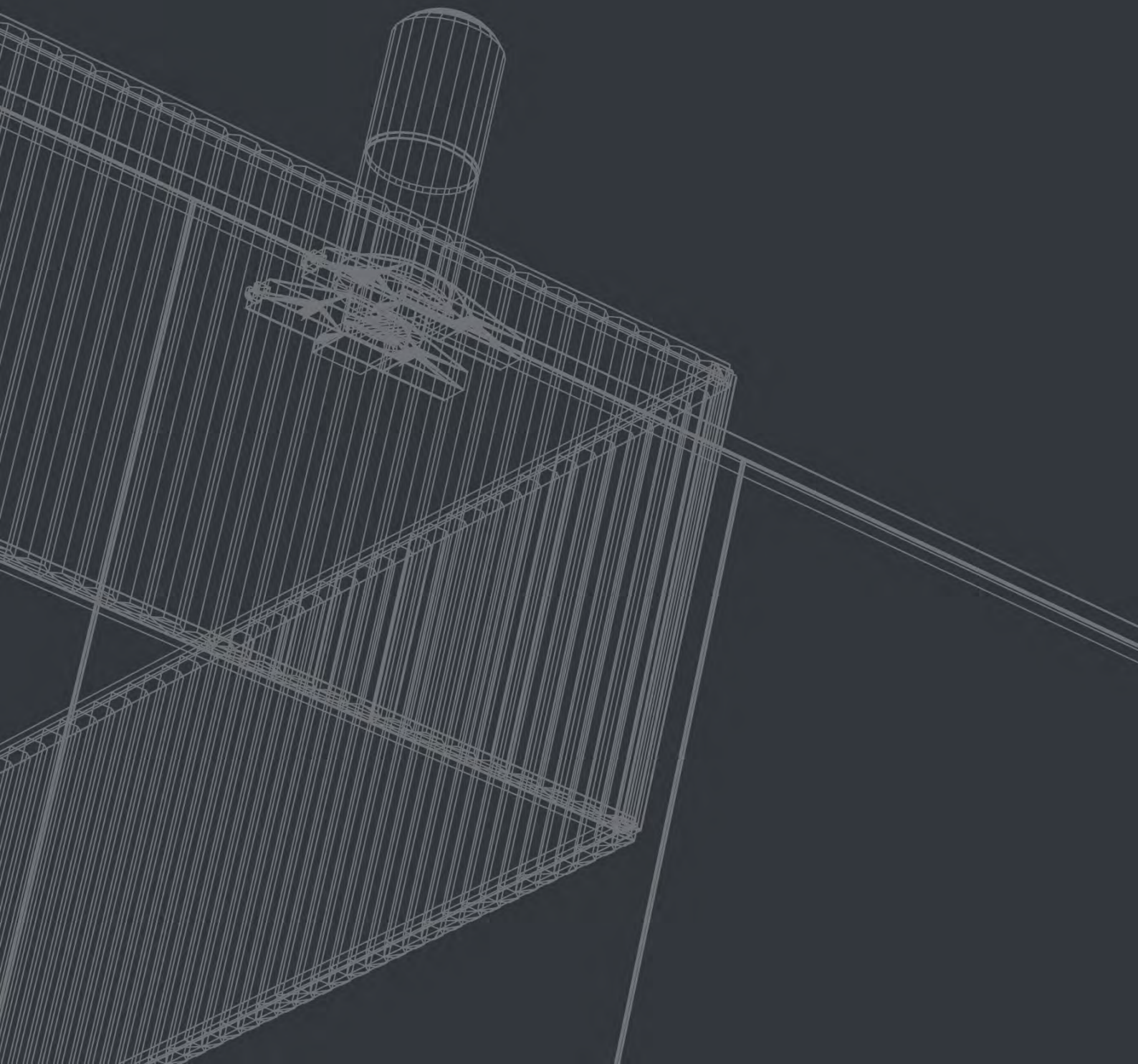
Aufgrund der Wiederherstellung der Nebenkühlwasserversorgung musste eine Druckentlastung des Primärcontainments nicht mehr durchgeführt werden (vgl. Quelle 16).

Am 15.03.2011 um 07:15 Uhr erreichte der Reaktor den Zustand „cold shutdown“ (vgl. Quelle 43).

Anmerkung 26
Weil es nicht zum Netzausfall kam und weil die nukleare Nebenkühlwasserversorgung wiederhergestellt werden konnte, kam es nicht zur Aktivitätsfreisetzung. Auch hier sind die Notfallmassnahmen zur Kühlwasserversorgung und wie diese in den Severe Accident Management Guidelines (SAMG) verankert sind, zu hinterfragen. Ferner ist nicht genau bekannt, ob ausreichendes Material für die durchzuführenden erforderlichen Notfallmassnahmen vor Ort vorhanden war.

Fukushima

37° 25‘ 26.57“ N, 141° 1‘ 56.87“ E
11.03.2011



3 Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current
BAF	Bottom of Active Fuel
BE	Brennelement
BWR	Boiling Water Reactor
CCF	Common Cause Failure
DC	Direct Current
DG	Dieselgenerator
DW	Drywell
ECCS	Emergency Core Cooling System
GE	General Electric Company
HPCI	High Pressure Coolant Injection
IAEA	International Atomic Energy Agency
IC	Isolation Condenser
IRS	Incident Reporting System
JAIF	Japan Atomic Industrial Forum Inc.
JMA	Japan Meteorological Agency
JST	Japan Standard Time
KMV	Kühlmittelverlust
LL	Low Low – Schaltwert
LOOP	Loss of Off-Site Power
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency
ODL	Ortsdosisleistung
OE	Operating Experience
OSART	Operational Safety Review Team
RCIC	Reactor Core Isolation Cooling
RDB	Reaktordruckbehälter
RESA	Reaktorschnellabschaltung
RHR	Residual Heat Removal

SAMG	Severe Accident Management Guidelines
SCRAM	Safety Control Rod Axe Man
SOER	Significant Operating Experience Reports
SRV	Safety Relief Valve
SBO	Station Blackout
TAF	Top of Active Fuel
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
WANO	World Association of Nuclear Operators

4 Quellenangabe

1 Sequence of Developments at Nuclear Power Stations Affected by the Earthquake Japan Atomic Industrial Forum Inc (JAIF) 2011-03-18 http://www.jaif.or.jp/english/aij/member/2011/2011-03-18c.pdf

2 Boiling Water Reactor, GE BWR/4, Technology Advanced Manual, Chapter 6.0, BWR Differences, USNRC Technical Training Centre Rev. 1195 http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0230/ML023010606.pdf

3 Seismic Damage Information (80th release), Nuclear and Industrial Safety Agency (NISA) 2011-04-08 http://www.nisa.meti.go.jp/english/files/en20110411-1.html

4 Press Release (Mar 12, 2011), Impact to TEPCO's Facilities due to Miyagiken-Oki Earthquake (as of 3PM), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-12 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031222-e.html

5 Press Release (Mar 12, 2011), White smoke around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit 1, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-12 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031225-e.html

6 Current Status of Units 1 to 4 at Fukushima Daiichi NPS (as of noon, March 17, 2011), Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-03-18 http://www.jaif.or.jp/english/aij/member/2011/2011-03-18a.pdf

7 Press Release (Mar 14, 2011), Occurrence of a Specific Incident (Failure of reactor cooling function) Stipulated in Article 15, Clause 1 of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-14 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031403-e.html

8 Press Release (Mar 13, 2011), Occurrence of a Specific Incident Stipulated in Article 15, Clause 1 of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-13 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031303-e.html

9 Earthquake Report No.66: 20:00, April 28, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-04-28 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1303986888P.pdf

10 Earthquake Report No.83: 18:00, May 16, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-05-16 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1305536094P.pdf

11 Integrity Inspection of Dry Storage Casks and Spent Fuel at Fukushima Daiichi, ISSF 2010 Session 6, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2010-11-16

12 Press Release (Apr 18, 2011), Status of TEPCO's Facilities and its services after the Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Earthquake (as of 4:00PM, April 18th), Past Progress Report, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-04-18 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11041804-e.html

13 Press Release (Mar 11, 2011), Occurrence of a Specific Incident Stipulated in Article 10, Clause 1 of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness (Fukushima Daini, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-11 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031104-e.html

14 Press Release (Mar 12, 2011), Plant Status of Fukushima Daini Nuclear Power Station (as of 11pm March 12th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-12 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031233-e.html

15 Press Release (Mar 15, 2011), Plant Status of Fukushima Daini Nuclear Power Station (as of 7:15 am Mar 15th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-15 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031501-e.html

16 Press Release (Mar 16, 2011), Impact to TEPCO's Facilities due to Tohoku-Taihei-you-Oki Earthquake (as of 2:00PM), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-16 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031608-e.html

17 Press Release (Mar 18, 2011), Status of TEPCO's Facilities and its services after Tohoku-Taiheiyou-Oki Earthquake (as of 10:00AM), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-18 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031802-e.html

18 Status of the Spent Fuel Pool of Unit 3 of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, (video on May 8th, 2011), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-08 http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/index-e.html

19 Japan's Nuclear Accident – Update Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) 2011-05-02

20 Earthquake Report No.84: 18:00, May 17, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-05-17 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1305623138P.pdf

21 Status of the Spent Fuel Pool of Unit 4 of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-08 http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/index-e.html

22 Press Release (May 15, 2011), Results of nuclide analyses of radioactive materials in water taken in common spent fuel pool of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-15 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11051510-e.html

23 Press Release (Mar 13, 2011), Plant Status of Fukushima Daini Nuclear Power Station (as of 8pm March 13th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-13 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031311-e.html

24 Press Release (Mar 12, 2011), Plant Status of Fukushima Daini Nuclear Power Station (as of 8pm March 12th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-12 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031230-e.html

25 Press Release (Apr 01, 2011), Plant Status of Fukushima Daini Nuclear Power Station (as of 4:00 pm April 1st), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-04-01 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11040104-e.html

26 Earthquake Report No.91: 18:00, May 24, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-05-24 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf ENGNEWS01_1306229916P.pdf

27 Tsunami Information (Estimated Tsunami arrival time and Height), Japan Meteorological Agency 2011-03-11, 14:49 http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html

28 Press Release (Mar 11, 2011), Occurrence of a Specific Incident Stipulated in Article 15, Clause 1 of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness (Fukushima Daiichi), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-11 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11031103-e.html

29 Earthquake Report No.58: 20:00, April 20, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-04-20 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1303298461P.pdf

30 Press Release (Apr 20, 2011), Status of TEPCO's Facilities and its services after the Tohoku-Chihou-Taiheiyou-Oki Earthquake (as of 9:00AM, April 20th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-04-20 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11042001-e.html

31 Pictures of Tsunami that hit the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (pictured on March 11, 2011), Place: North side of Radiation Waste Treatment Facility taken from 4th floor, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-19 http://www.tepco.co.jp/en/news/110311/index-e.html

32 Press Release (May 16, 2011), Submission of report to the Ministry of Economy, Trade and Industry on the damage of electric facilities inside and outside of Fukushima Daiichi NPS and the situation of recovering offsite power supply through emergency measures since the Tohoku-Taiheiyou-Oki Earthquake Report regarding Collection of Reports pursuant to the Provisions of Article 106, Paragraph 3 of the Electricity Business Act, esp. Appendix 5, Damages to electric facilities at Fukushima Dai-ich, Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-16 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11051613-e.html

33 Reactor Core Status of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station Unit 1, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-15 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110515e10.pdf

34 Mark I Containment Report, Nuclear Energy Institute (NEI) 2011-03-19 http://www.nei.org/filefolder/Report_-_BWR_Mark_I_Containment_03192011_2.pdf

35 Press Release (Mar 20, 2011), Plant Status of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (as of 6:00 PM Mar 20th), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-03-20 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11032009-e.html

36 Information on Status of Nuclear Power Plants in Fukushima, Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-06-01 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1306898792P.pdf

37 Press Release (May 10, 2011), Results of Nuclide Analyses of (Radioactive Materials in the) Water in Spent Fuel Pool of Unit 3 at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-10 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11051009-e.html

38 Press Release (May 09, 2011), Results of analysis of spent fuel pool water of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Unit 4 (2nd continued report), Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-09 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11050905-e.html.

39 Informationen zur Lage in Japan: Stand 05.04.2011, 12:30 Uhr (MESZ), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH 2011-04-05 http://fukushima.grs.de/kommunikation-medien//japan-statusmeldung-stand-05-04-2011-1230

40 Status of nuclear power plants in Fukushima as of 21:00 March 22 (Estimated by JAIF), Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF)2011-03-22 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1300796691P.pdf

41 Press Release (May 20, 2011), Report to Nuclear and Industrial Safety Agency on emergency countermeasures for safety at Fukushima Daini Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-20 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11052017-e.html

42 Status of cores at Units 2 and 3 in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-05-23

43 Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations - June 7, 2011 http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html

44 Press Release (Jun 18, 2011), First Response at Tohoku Chihou Taiheiyou Oki Earthquake in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company (TEPCO) 2011-06-18 http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061805-e.html

45 Recommendations for enhancing reactor safety in the 21st century, The near-term task force review of insights from the Fukushima Dai-ichi accident, United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC) July 12, 2011 http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1118/ML111861807.pdf

46 IAEA International fact finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the great east Japan earthquake and tsunami, International Atomic Energy Agency (IAEA) June 16, 2011 http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf

47 Earthquake Report No.177: 12:00, August 18 Japan Atomic Industrial Forum Inc. (JAIF) 2011-08-18 http://www.jaif.or.jp/english/news_images/pdf/ENGNEWS01_1313640580P.pdf

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI

Herausgeber
Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Informationsdienst
CH-5200 Brugg
Telefon 0041 (0)56 460 84 00
Telefax 0041 (0)56 460 84 99
info@ensi.ch
www.ensi.ch

ENSI-AN-7614 Rev. 1
Herausgegeben am 26.08.2011